

契約概念に基づく利用者指向センサデータ流通基盤に関する研究

著者	生出 拓馬
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	11301甲第18197号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00122884

平成 29 年度 博士学位論文

契約概念に基づく
利用者指向センサデータ流通基盤
に関する研究

東北大学大学院情報科学研究科 応用情報科学専攻

博士課程後期 3 年の課程

情報通信ソフトウェア学講座 (菅沼・阿部 (亨) 研究室)

B5ID4001 生出 拓馬

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.1.1	Internet of Things (IoT)	1
1.1.2	Mobile Ad-hoc Network (MANET)	3
1.1.3	People-centric Network (PCN)	6
1.1.4	PCN に基づくセンサデータ流通基盤	7
1.2	本研究の概要	8
1.2.1	目的	8
1.2.2	課題	9
1.2.3	本研究の位置付け	14
1.3	本論文の構成	18
第 2 章	自律分散型 P2P 通信基盤	20
2.1	はじめに	20
2.2	関連研究と課題	22
2.2.1	P2P ネットワーク	22
2.2.2	安否情報共有システム	24
2.2.3	関連研究における課題	25
2.3	Waon	26
2.3.1	概要	26
2.3.2	ネットワーク構造	28

2.3.3	経路表の更新	29
2.3.4	動的負荷分散	31
2.4	Waon に基づく P2P 型安否情報共有システム	34
2.4.1	概要	34
2.4.2	ノードの動作	37
2.4.3	コンテンツの流通	38
2.4.4	ネットワークの維持	41
2.5	評価	43
2.5.1	Waon の性能評価	43
2.5.2	P2P 型安否情報共有システムの機能評価	45
2.5.3	P2P 型安否情報共有システムの性能評価	46
2.5.4	考察	53
2.6	まとめ	54
第 3 章	契約概念に基づくセンサデータ流通基盤	56
3.1	はじめに	56
3.2	関連研究と課題	59
3.2.1	センサ型アプリケーション	59
3.2.2	データ共有プラットフォーム	60
3.2.3	関連研究における課題	61
3.3	COSAP	62
3.3.1	概要	62
3.3.2	想定する環境	63
3.4	設計	64
3.4.1	契約指向サービス構成モデル	64
3.4.2	情報流通プロトコル	69
3.5	評価	77
3.5.1	COSAP の動作検証	77

3.5.2	契約締結プロトコルの性能評価	83
3.5.3	契約内容変更プロトコルの性能評価	86
3.5.4	考察	91
3.6	まとめ	93
第 4 章	センサデータ流通基盤の実環境への適用	94
4.1	はじめに	94
4.2	関連研究と課題	96
4.2.1	Wi-Fi Direct	96
4.2.2	Wi-Fi Direct を用いたマルチホップ通信基盤	97
4.2.3	関連研究における課題	98
4.3	予備実験	99
4.3.1	概要	99
4.3.2	結果と考察	100
4.4	ICOS	101
4.4.1	概要	101
4.4.2	トポロジ構築機構	102
4.4.3	マルチホップ通信機構	104
4.5	ICOS に基づくセンサデータ流通システム	107
4.5.1	概要	107
4.5.2	トポロジ構築機構の実装	108
4.5.3	マルチホップ通信機構の実装	111
4.5.4	センサデータ流通機構の実装	112
4.6	評価	112
4.6.1	センサデータ流通システムの動作検証	112
4.6.2	トポロジ構築機構の性能評価	115
4.6.3	マルチホップ通信機構の性能評価	117
4.6.4	考察	121

4.7	おわりに	122
第 5 章	結論	124
5.1	本研究の目的と課題	124
5.2	各章の成果	125
5.3	本研究の成果	127
5.4	本研究の適用範囲	128
5.5	今後の課題	129
謝辞		131
発表論文		133
著作物利用許諾		140
参考文献		142

目次

1.1	超スマート社会のシステムイメージ	2
1.2	MANET の分類	4
1.3	MANET の概念図	5
1.4	本研究における研究課題	10
1.5	(課題 A) センサデータ流通基盤のネットワーク構築に関する課題	11
1.6	(課題 B) センサデータ流通基盤の流通経路構築に関する課題	12
1.7	(課題 C) センサデータ流通基盤の利用環境構築に関する課題	13
1.8	IoT 領域における本研究の位置付け	15
1.9	MANET 領域における本研究の位置付け	16
1.10	センサデータ流通領域における本研究の位置付け	17
1.11	本論文の構成	19
2.1	ネットワーク構造	28
2.2	近距離用リンク更新の擬似コード	30
2.3	遠距離用リンク更新の擬似コード	31
2.4	平均負荷推定の擬似コード	32
2.5	動的負荷分散の概要	33
2.6	動的負荷分散の擬似コード	33
2.7	P2P 型安否情報共有システム	36
2.8	複製の生成	39
2.9	コンテンツ検索の擬似コード	41

2.10	Fairness Index の推移	44
2.11	メッセージ量の推移	44
2.12	管理コンテンツ	45
2.13	検索結果	47
2.14	設定パラメータ例	47
2.15	ネットワーク環境区分	47
2.16	参加ノード率の推移	49
2.17	環境毎の検索性能の推移	50
2.18	複製頻度毎の検索性能の推移	51
2.19	負荷分散性能の推移	52
3.1	センサ型アプリケーションのサービス構成モデル	57
3.2	提案の概要	63
3.3	契約形態	66
3.4	契約締結プロトコルのシーケンスチャート	70
3.5	契約内容変更プロトコル（監視）のシーケンスチャート	73
3.6	契約内容変更プロトコルにおける意思決定フローチャート	75
3.7	契約内容変更プロトコルのシーケンスチャート	76
3.8	評価用アプリケーション	77
3.9	COSAP の動作検証（シミュレータ）の想定環境	78
3.10	動作検証（実端末）の実験結果	82
3.11	契約段数毎の鮮度の平均 ($\alpha = 1.0$).	85
3.12	ポリシー違反数と各時間の相関	89
3.13	App 201 の送信メッセージ量の割合（Case A）	90
4.1	予備実験における実験結果	100
4.2	トポロジの構築手順	103
4.3	トポロジの構築例	104

4.4	経路表の構築例	106
4.5	ICOS に基づくセンサデータ流通システム	107
4.6	トポロジ構築機構のシーケンス図	109
4.7	マルチホップ通信機構のフローチャート	111
4.8	動作検証シナリオ	113
4.9	動作検証結果	114
4.10	トポロジ構築機構の性能評価実験結果	116
4.11	実験トポロジ（マルチホップ通信機構の性能評価）	118
4.12	ホップ数毎の端末間通信の実験結果	120
5.1	本研究の成果	127

表目次

2.1	実験で用いた安否情報	46
2.2	各ネットワーク環境区分と設定パラメータ	48
3.1	ポリシーの属性の定義	65
3.2	提供者／利用者の属性の定義	66
3.3	提供者／利用者のポリシーの定義	67
3.4	契約の属性の定義	68
3.5	契約のポリシーの定義	68
3.6	センサデータの属性の定義	68
3.7	メッセージの属性の定義	69
3.8	動作検証（シミュレータ）の実験結果（環境 1）	80
3.9	動作検証（シミュレータ）の実験結果（環境 2）	81
3.10	実験結果（契約締結プロトコルの性能評価）	84
3.11	契約段数毎の同じデータの誤送信数	85
3.12	実験結果（契約内容変更プロトコルの性能評価：Case A）	88
3.13	実験結果（契約内容変更プロトコルの性能評価：Case B）	88
3.14	実験結果（契約内容変更プロトコルの性能評価：Case C）	89
3.15	実験結果（契約内容変更プロトコルの性能評価：全 Case）	89
4.1	使用した Android 端末	108
4.2	端末間通信の実験結果（RTT (ms) / 失敗回数）	119

第 1 章 序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 Internet of Things (IoT)

モノのインターネット (Internet of Things: IoT) は、身の回りにあるあらゆるモノを相互に接続してインターネットを構築する概念であり、2010 年頃から学術領域で提唱されはじめたパラダイムである [1]。特に近年では、センサデバイスの小型化や高機能化に伴って IoT 環境の社会実装が可能となり、ウェアラブルデバイスを用いたヘルスケアシステムや効率的な物資輸送システムの開発といった産業界での応用 [2] や、スマートシティの実現に向けた環境モニタリングシステムや交通管理システムといった社会基盤のための要素システムの研究開発 [3]、政府が主体となった ICT 農業 [4] の展開等のように産学連携した取り組みが推進されている。IP ネットワークに接続される端末数が 2016 年の 1 人あたり 2.3 台から 2021 年には 1 人あたり 3.5 台に増加するという試算もあり [5]、IoT 社会の浸透は今後も世界規模で加速すると考えられる。

このような IoT 社会の到来に対する日本の今後の取組みとして、2016 年 1 月に第 5 期科学技術基本計画 [6, 7] が閣議決定された。この基本計画は 2016 年から 2021 年までの 5 年間において取り組むべき科学技術政策の指針を定めたものであり、その中で、『ICT を最大限に活用し、サイバー空間とフィジカル空間（現実世界）とを融合させた取組により、人々に豊かさをもたらす「超スマート社会」を未来社会の姿として共有し、その実現に向けた一連の取組を更に深化させつつ「Society 5.0」として強力に推進し、世界に先駆けて超スマート社会を実現していく。』（文献 [7], P11 より引用）とされている。そして、超スマート社会の実現のために必要な取組みとして『様々な「もの」がネットワークを

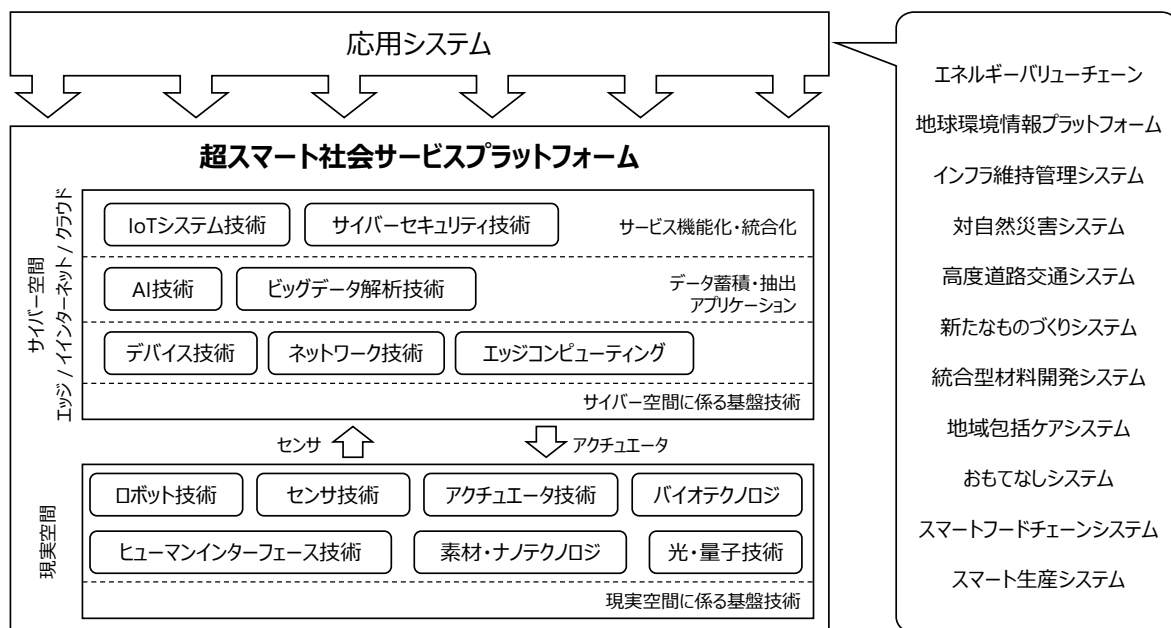


図 1.1 超スマート社会のシステムイメージ

介してつながり、それらが高度にシステム化されるとともに、複数の異なるシステムを連携協調させること』(文献 [7], P11 より引用)と定められている。この取り組みを体系化したシステムイメージを図 1.1 (文献 [7] より作成)に示す。超スマート社会では、超スマート社会サービスプラットフォーム上で、現実空間のロボットやセンサから大量のデータを獲得してサイバー空間のネットワーク上を流通させ、AI 技術やビッグデータ解析技術に基づく IoT システムによって価値を創造し、それらの価値を現実空間へ還元する。さらに、このサービスプラットフォームでは、様々な IoT システムを高度に連携させ、より大きな価値を生み出す高度協調 IoT システムを創出することで、人々に豊かさをもたらす未来社会を創造する。これらから、IoT 社会への期待の高まり及びそれらを支える基盤技術の高度化が社会へ与えるインパクトは非常に大きいことが窺える。

今日の IoT 社会においては、センサデバイスから取得したデータを利用する IoT システムを構築する際に、ICT 農業や環境モニタリングといった特定の目的のためにあらかじめ専用のセンサデバイスを設置してデータを収集し、解析結果を利用者に提示するというシステム構成がとられている。しかし、超スマート社会においては、そういった専用

のセンサデバイスに加えて、ロボットや公共のセンサデバイス、そして個人の所有するスマートフォンやウェアラブルデバイスといった、特定の利用目的を持たない汎用的なセンサデバイスからもセンサデータを獲得し高度に連携させる必要がある。特にスマートフォンのような携帯電話については、日本国内において契約率が近年 100% を突破しており [8]、今後も増加することが予測されているため、従来の専用センサデバイスの利活用だけではなく、汎用センサデバイスの利活用方法の確立が、今後の超スマート社会を加速させる要因の一つであるといえる。

1.1.2 Mobile Ad-hoc Network (MANET)

超スマート社会の実現に向けた、センサから得られる大量のデータを流通させるためのネットワーク技術について、学術領域においては任意のセンサデバイス間でデータを共有するための Mobile Ad-hoc Network (MANET) 技術に関する研究が 1990 年代から進められてきた [9,10]。MANET は特定のインフラを持たずに近隣のセンサデバイス間でアドホックにネットワークを構築しデータの共有を行うための技術である。そのため、MANET に参加するセンサデバイス（ノード）は、自身に関するデータの送受信だけではなく、他ノードに関するデータの転送を行う中継ノードとしても機能する。MANET はその後、対象とするセンサデバイスやアプリケーションに応じて細分化が進められた（図 1.2, 文献 [9] より作成）。

Wireless Mesh Network (WMN) は、専用デバイス間でメッシュネットワークを構築し、その中から選出されたゲートウェイ (GW) がインターネットと接続することで、安価で柔軟にインターネットを拡張するという考えに基づいたネットワークである。利用者の端末は任意の専用デバイスに接続することでネットワークに接続する 2-tier ネットワークアーキテクチャを採用しているため、利用者端末の性能や移動性がネットワーク性能に与える影響が少なく済むことから、大規模で信頼性の高い MANET を構築することが可能である。

Wireless Sensor Network (WSN) は、特定の目的の実現のために事前にセンサデバイスの選定やネットワーク構成の設計を行い、それらに従って構築されるネットワークで

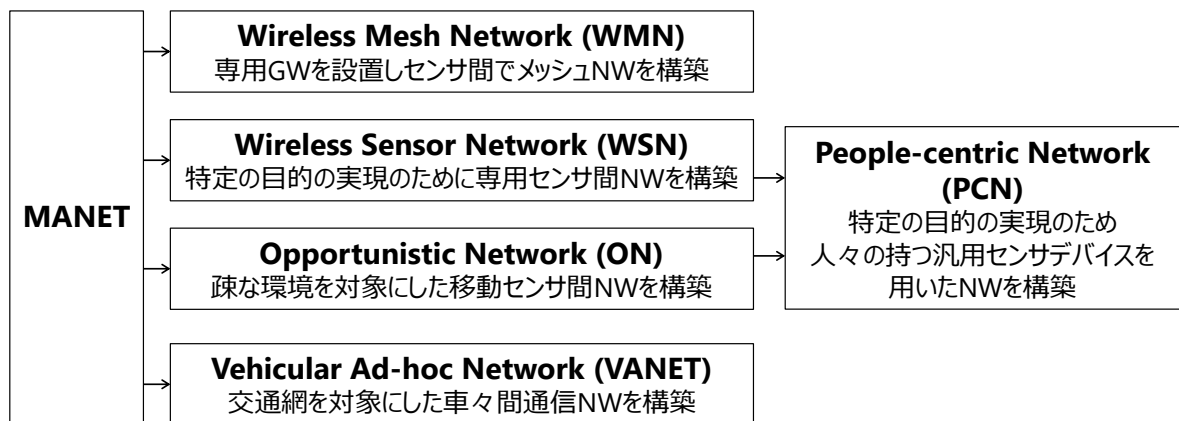


図 1.2 MANET の分類

ある．アプリケーションの要件に沿ったネットワークを事前に構築できるため，サービス品質 (Quality of Service: QoS) の高いアプリケーションを搭載する MANET を構築することが可能である．そのため，ICT 農業や環境モニタリングといった 1.1.1 節で述べた現在の応用例の多くは WSN の概念に基づいた研究開発事例であるといえる．

Opportunistic Network (ON) は，利用者の物理的な移動を前提とし，専用デバイスを用いずに利用者端末のみで構築する疎なネットワークである．ON では，常に全ての端末が 1 つのネットワークに参加している保証が無いため，中継ノードとして機能する際に目的のデバイスが発見できない場合は，一定時間メッセージを保持する戦略をとる．これは災害時等の劣悪なネットワーク環境下における通信を目的とした遅延耐性ネットワーク (Delay/Disruption Tolerant Network: DTN) における “Store-carry-forward” 方式と同等のものであり，図 1.1 で示した対自然災害システムの実現に有効なネットワーク技術の一つである．

Vehicular Ad-hoc Network (VANET) は，利用者端末として乗用車を想定したネットワークであり，乗用車の位置や速度を車々間 (vehicle-to-vehicle: V2V) 通信または車路間 (vehicle-to-roadside: V2R) 通信することで共有し，渋滞や交通事故の抑制を実現する．この時，V2V であれば ON の一分野，V2R であれば WMN の一分野とも捉えることができ，特に図 1.1 で示した高度道路交通システム (Intelligent Transport System: ITS) を実現するための要素技術として注目されている．

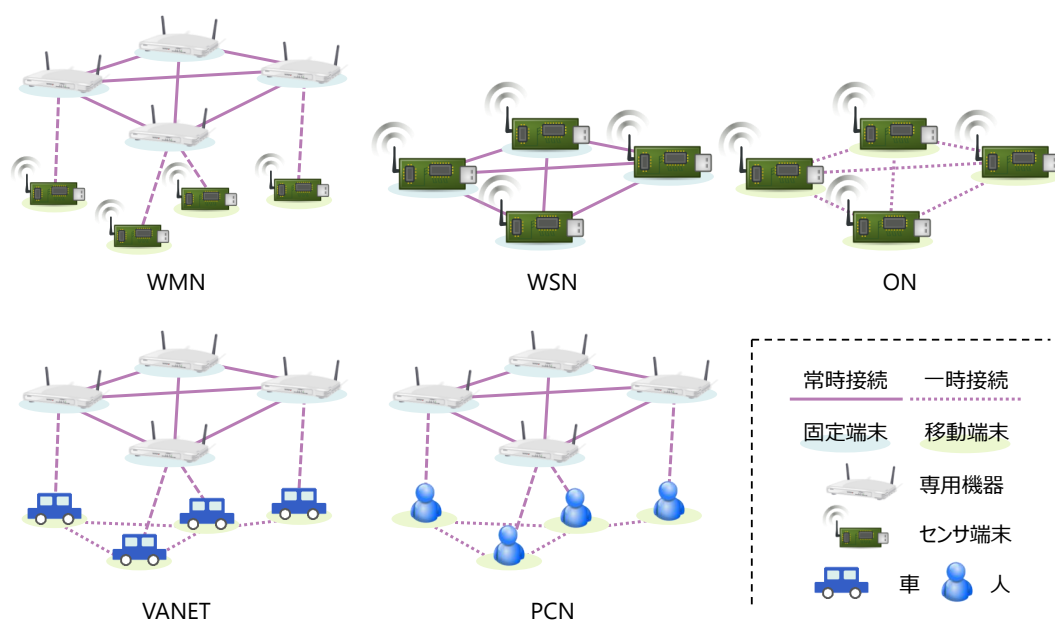


図 1.3 MANET の概念図

People-centric Network (PCN) は，利用者端末としてウェアラブルデバイスやスマートフォンを想定したネットワークであり，“人そのものをネットワークに接続する”という概念に基づく新たなパラダイムである．PCN では，利用者はそのネットワーク上で提供されるサービスの利用者 (Consumer/Subscriber) であると同時に，そのサービスを支えるデータの提供者 (Provider/Publisher) としても振る舞う [11]．ネットワーク形態としては，事前に専用のインフラを構築して利用者間でデータを共有する WSN の概念に基づく方式と，事前の用意を行わず利用者間のすれ違い通信等でデータを共有する ON の概念に基づく方式に大別される．

図 1.3 にこれらのネットワークの概念図を示す．ここで，1.1.1 節で述べた今後必要とされる汎用センサデバイスの利活用の観点から，適切な要素技術について考えると，対象とするセンサデバイスが利用者が普段携帯するスマートフォンであり，利用者間で自由にセンサデータの共有が可能である必要があることから，本研究では PCN に着目する．

1.1.3 People-centric Network (PCN)

一般の利用者をシステムの構成要素の一部として組み込んだモデルの考え方を People-centric パラダイムといい [10,12,13], MANET 分野の文脈においては, 利用者が日常的に携帯する汎用センサデバイス (スマートフォン) あるいは利用者そのものを汎用センサデバイスと見做して利用することを前提としたネットワーク (People-centric Network: PCN) を指す. このパラダイムに基づいたシステムでは, 利用者がデータの獲得や流通の役目も担うことから, 事前にシステムの開発者が専用のセンサ端末を用意する必要が無いため, 低コストで大規模かつ詳細なセンサデータを収集可能である. そのため, WSN に代わる新たなアプリケーション構成モデルのパラダイムとして注目を集めている. なお, PCN では従来までのパラダイムとは異なり, サービスの提供に必要なセンサデータは利用者から提供してもらう必要があるため, サービス開発者は多くの参加者を募るためにデータ提供者に対して報酬を与えることが一般的である. そのため, こういったサービスの普及により, これまでのように自身のサービス利用目的でのみセンサデータを収集し提供するだけでなく, 報酬目的で自身にとって不要なセンサデータを敢えて収集し提供するといった, センサデータ利用に対する意識の変容が起こることが考えられる.

People-centric Paradigm におけるセンシング形態は, Participatory Sensing と Opportunistic Sensing に大別される [12].

Participatory Sensing [14] では, 利用者は特定の目的を持って個々のサービスが抱えるネットワークに参加し, 主にサーバを介して全参加者とデータの共有を行う [13]. 参加者はネットワークへの参加によって提供データの種類や利用用途に同意したとみなし, 特定のデータの提供の見返りとしてそれらの解析結果等のサービス利用権や報酬が与えられる. この時, 参加者は能動的にネットワークに参加することでセンサデータの提供を開始するため, そのネットワークへの参加の是非を通して参加者個々のプライバシーポリシーの反映が可能となる一方で, データ提供のためには目的を満たすサービスの発見や, そのサービスのネットワークへの参加といった煩雑な操作が必要とされる.

一方, Opportunistic Sensing [15] では, 利用者は特定の目的を持たずにアドホックに

ネットワークに参加し、主に近隣の利用者のみとデータの共有を行う [13]。得られるセンサデータが各参加者のいる物理的な位置関係に影響されるため、局所的な環境モニタリングや情報共有、ソーシャルネットワークといった用途で用いられることが一般的である。この時、参加者は受動的に不特定のデータを周辺の参加者へ提供するため、データ提供のための煩雑な操作が不要である一方で、参加者個々のプライバシーポリシーを柔軟に反映させることが困難である。

PCN に基づく IoT システムの構築例として NoiseTube [16] や CommonSense [17], SmartCitizen [13] 等がある。NoiseTube では、参加者から位置データと騒音データを収集し、地図上に騒音情報を重畳したノイズマップを提供するアプリケーションである。また、CommonSense では専用のデバイスを所持した参加者が動き回って環境情報を収集し、地図上に空気の汚染情報を重畳し表示するシステムが提案されている。また、SmartCitizen では、参加者からランニング経路等の情報を収集し、それを近隣住民と共有するシステムが提案されている。このように、PCN に基づく IoT システムでは、あらかじめ収集するデータや収集データの利用用途を明確にして参加者を募集し、実際に提供されるサービスの価値は参加者自身が創造する。

1.1.4 PCN に基づくセンサデータ流通基盤

前節で述べた IoT システムは、それぞれのシステムが独立してネットワークを構築し、あらかじめ用途を定めた上で参加者を募るシステムモデルである。しかし、今後ますますセンサデバイスが普及しその用途が爆発的に多様化する社会においては、1.1.1 節で述べたように、関連する IoT システムを束ね高度な連携を促す高度協調 IoT システムを創造する枠組みづくりが必要とされている。そのため、近年では、あらかじめ IoT システムを構築しておくのではなく、参加者からの要求に基づいて任意の IoT システムを複数同時に展開可能なセンサデータ流通基盤に関する研究開発が進められている。

Participatory Sensing に基づくデータ流通基盤には、位置情報・文字情報・画像情報に利用データを限定した流通基盤である Sensr [18], 緊急度を考慮した任意のセンサデータの流通基盤である Help me! [19], データの加工等もサポートするコンポーネント型の

データ流通基盤である DisCoPar [20] 等が提案されている。これらの流通基盤では、利用者は自分の欲しいデータに関する情報をタスクとして利用者全員が閲覧可能な共有スペースに投稿し、それを閲覧した他の利用者がデータ提供の可否を決定している。そのため、参加者は他のすべての参加者を対象としてセンサデータの利用が可能である。

一方、Opportunistic Sensing に基づくデータ流通基盤には、オンラインソーシャルネットワーク (OSN) 上で定義される利用者間の関係性を考慮したデータの流通基盤である CAMEO [21] 等が提案されている。この流通基盤では、OSN 上の知人のうち条件を満たす利用者の端末のみから必要なデータをアドホックで獲得する。そのため、参加者は必ずしもすべての参加者を対象としてセンサデータを利用できるわけではない。

1.2 本研究の概要

1.2.1 目的

1.1 節で述べたように、身の回りのあらゆるモノがインターネットに接続され、そこから獲得される大量のデータに基づいたサービスを利活用しながら生活する IoT 社会の到来が世界規模で加速している。その中で、現在社会実装が進んでいるアプリケーションの多くは、市街地や農地にあらかじめ設置した専用のセンサデバイスから情報を収集し活用するシステムモデルとなっている。ところが、今後普及が進んでいくと見込まれているのはスマートフォンやロボットといった、特定の目的を持たずに設置される汎用的なセンサデバイスであり、これらから創出される多種多様なデータの利活用が今後の IoT 社会の高度化に必要不可欠な領域となっている。

そこで本研究では、そういった汎用センサデバイスから得られる様々なセンサデータを、時間・空間・用途・相手に依らずに自由に獲得し共有可能な利用者指向のセンサデータ流通基盤の実現を目的とする。本研究で実現を目指すセンサデータ流通基盤では、あらかじめ用途を定めた上で配置されている専用センサデバイスではなく、どのシステムの所有物ではない利用者個人の持つ汎用的なセンサデバイスを対象とし、ある参加者の要求に基づいて動的にセンサデバイスを発見して即時的にアプリケーションを構築する。この

時のセンサデバイスの発見はリアルタイムかつ空間的な制約を設けず常にネットワーク全体から検索可能であるものとし、これによりデータ利用者からのセンサデータ要求を充足する最大のセンサデバイスの提供を可能とする。また、センサデータの提供はその所有者であるデータ提供者の嗜好を反映し、データの利用目的や提供相手に応じて柔軟に制御することで、データ提供者からの提供ポリシーを充足する最大のセンサデータの利用を可能とする。これらにより、データ利用者の要求およびデータ提供者のポリシーを満たしつつ自由なセンサデータの共有を可能とする利用者指向のセンサデータ流通基盤を実現する。

本研究の遂行により予想される効果として、一般の利用者が自身のスマートフォンを通じて自由かつ安全にセンサデータを流通する社会の実現に貢献することができる。本流通基盤は物理的なネットワークの構築から多様な用途に対応可能なアプリケーションの構築までの機能を提供する包括的なプラットフォームであり、特定のインフラや事前設定が不要で利用可能であるため、専門知識を持たない利用者が煩雑な操作なしに利用することが可能である。そのため、一般の利用者が日常的にデータの提供者となることができ、その提供に見合った見返りを享受できるようになるため、生活様式や経済活動の大きなパラダイムシフトを誘引する可能性がある。また、本研究の実現によって、利用者要求や提供ポリシー等を考慮したセンサデータの共有が可能となり、今後のセンサ利用アプリケーションやセンサフュージョンの学術分野において大きく貢献できる。特に、スマートシティや対災害 ICT システムといった、多種多様なセンサデバイスを利用する大規模分散システムへの多大な貢献が期待できる。

1.2.2 課題

そこで本研究では、1.2.1 節で述べた目的の実現に向けての研究課題を以下のように設定する（図 1.4）。

課題 A センサデータ流通基盤のネットワーク構築に関する課題：従来の PCN に基づくアプリケーション [13,16,17] では、サービス毎に専用のセンサデバイスを接続し、

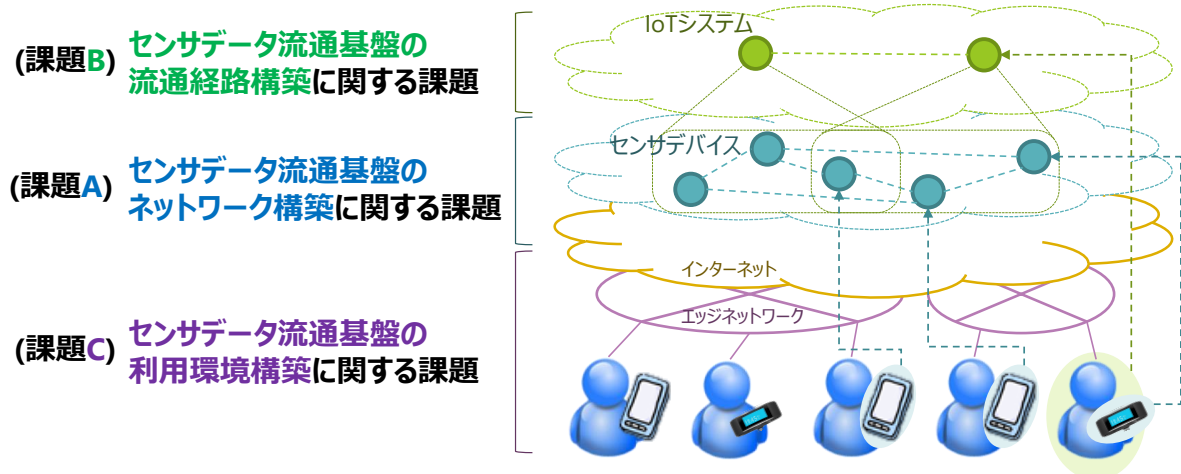


図 1.4 本研究における研究課題

それぞれ独立したネットワークを構築する垂直統合型のサービス構成モデルの利用が一般的である。しかし、1.2.1 節で述べた目的の環境においては、図 1.5 に示す課題が存在する。まず、汎用的なセンサデバイスはあらかじめ特定のサービスに接続されていないため、センサデバイスの所有者は任意のアプリケーションへ能動的に参加しネットワークに自身のセンサデバイスを接続する必要がある。この時、IoT 社会の浸透に伴って構築される IoT システムも膨大な数になることが想定されるため、要件を満たすアプリケーション全てにセンサデバイスが接続される状況は考えにくい。そのため、アプリケーション構築者は、不十分なセンサデバイスの参加、およびロボット等の能動的な意思を持たないセンサデバイスの不参加に伴うデータ獲得機会の損失が考えられる。また、従来のサービス構成モデルにおいては、センサデータを提供した参加者に対して、サービスの提供や金銭等の報酬を見返りとして与えることが一般的である。そのため、ネットワーク参加者は、参加可能なネットワークへの不参加によるサービス利用機会や報酬の獲得機会の損失が考えられる。以上から、アプリケーション毎にネットワークを構築しデータを収集する従来の垂直統合型のサービス構成モデルでは、センサデバイスや利用用途の多様化に対応するネットワーク構築が困難である。

本研究で目的とする環境においては、柔軟に接続先のサービスを切り替える必

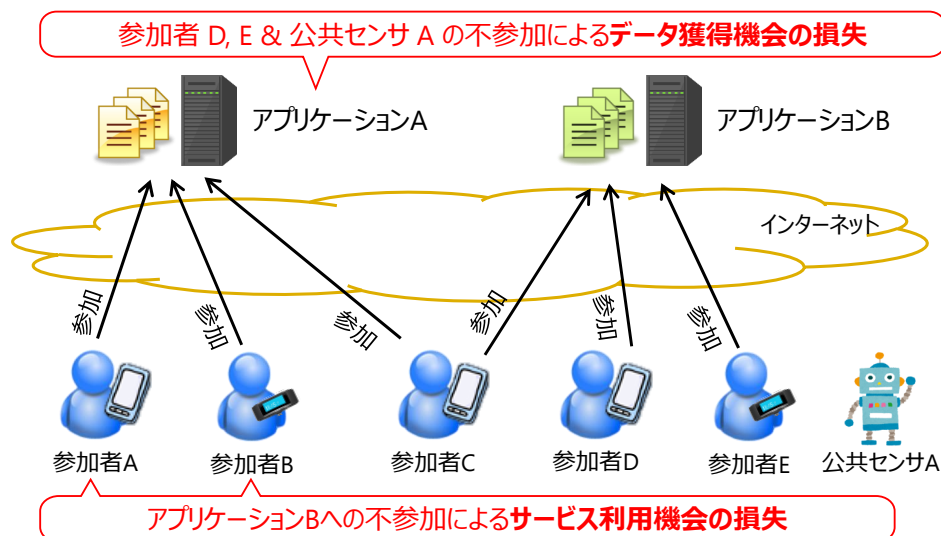


図 1.5 (課題 A) センサデータ流通基盤のネットワーク構築に関する課題

要があるため、アプリケーションならびに各センサデバイスが相互に連携可能な水平分散型のサービス構成モデルへ移行する必要がある。また、この時のサービスも事前に構築されたものではなく、利用者の要求に基づいて即時的に構築・解消が行われる必要がある。そのため、クラウドやサーバ上にあらかじめ構築されたサービスに参加者が接続する静的なアーキテクチャではなく、利用者からの要求や環境の変化に応じて自律的にその構成を変化させる動的なアーキテクチャであることが望ましい。

課題 B センサデータ流通基盤の流通経路構築に関する課題：従来の PCN に基づくアプリケーション [13, 16, 17] およびセンサデータ流通基盤 [18–20] では、センサデータを利用する際に、参加者の所有するセンサデバイスからデータを獲得してサーバやクラウドに蓄積し、その解析結果（サービス内容）を見返りとして参加者に提供する利用モデルが一般的である。しかし、1.2.1 節で述べた目的の環境においては、図 1.6 に示す課題が存在する。まず、目的の環境においては、従来の専用センサデバイスを用いて構築されるサービスとは異なり、そのサービスを構成するセンサデバイスを発見し、センサデータの流通経路を構築する必要がある。そして、各センサデバイスにはそれぞれ異なる所有者が存在するため、各サービスはセンサデバイスおよび必要に応じて他のサービスと高度に連携し、センサデータ

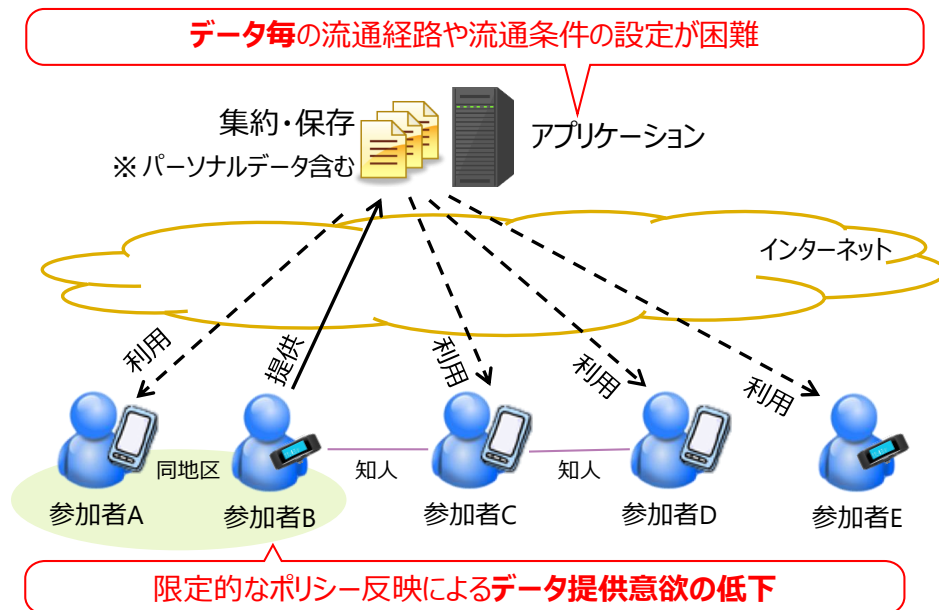


図 1.6 (課題 B) センサデータ流通基盤の流通経路構築に関する課題

の利用用途および所有者個々のプライバシーポリシーに合わせた流通条件の決定を、経路毎に解決する必要がある。特に、スマートフォン等のウェアラブルデバイスから送出されるセンサデータには、位置情報等といった個人を特定しうるパーソナルデータ [22, 23] を含むことがあり、これらは適切な匿名化等を施してもデータの送出そのものに社会的な不安が存在することが知られている [24, 25]。そのため、データの流通範囲や利用用途をデータ個々の粒度で制御可能なメカニズムの確立が必要である。しかし、従来の利用モデルにおいては、センサデータは画一的に処理・保存され、それらが不特定多数の他参加者から参照される可能性があるため、データ毎に参加者間の関係に基づいた流通経路や流通条件の設定が困難である。また、サービス参加者は、公開範囲を限定したデータの提供や知人に限定した公開といった柔軟なポリシー要求を反映させることができず、データ提供意欲が低下することが考えられる。以上から、サーバやクラウドにセンサデータを事前に集約し利用する従来のデータ利用モデルでは、参加者間の関係性やデータの利用用途に応じた柔軟な流通経路の構築が困難である。

本研究で目的とする環境においては、「課題 A：センサデータ流通基盤のネットワーク構築に関する課題」を解決する水平分散型のネットワーク基盤上において、

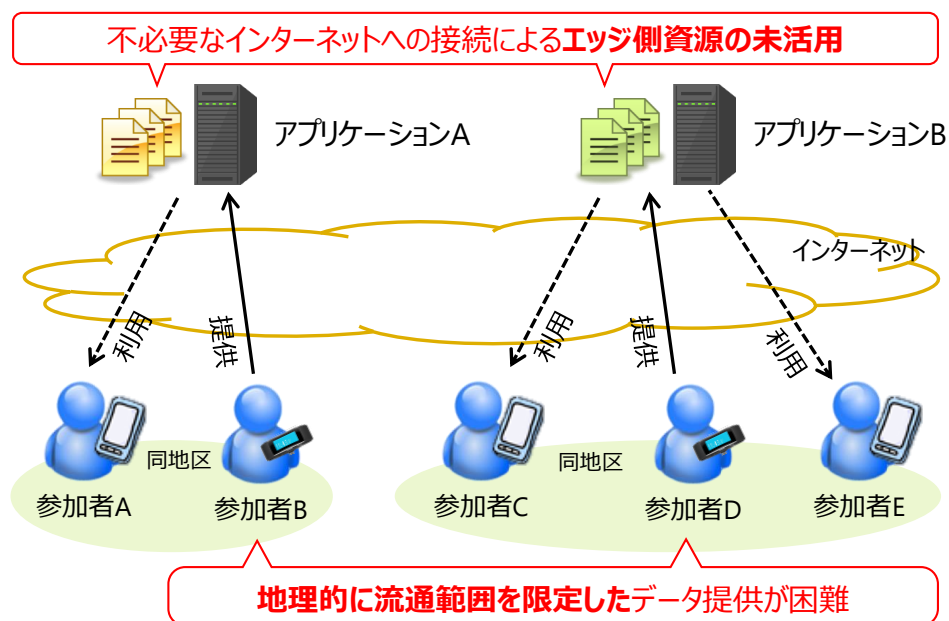


図 1.7 (課題 C) センサデータ流通基盤の利用環境構築に関する課題

参加者間の直接通信によって上記の課題を解決する必要がある。そのため、データ利用者の要求とデータ提供者の提供ポリシーの双方を考慮し、適切なセンサデータの流通経路・流通条件を決定する必要がある。また、それらの条件の決定は各参加者間で決定する必要があり非常に煩雑になることが考えられるため、交渉及びセンサデータの流通は自動化されることが望ましい。

課題 C センサデータ流通基盤の利用環境構築に関する課題：従来の PCN に基づくアプリケーション [13, 16, 17] では、利用者端末を用いてサービスを利用する際に、あらかじめ用意されたサーバに接続することでネットワークへ参加する。しかし、IoT 環境において利用されるアプリケーションの多くでは、1.1.1 節で例示したように、リアルタイム性やそのセンサデバイスとの物理的な近傍性が大きく関わるということが多くある。そのため、特にデータ利用者とデータ提供者が物理的に近傍に存在する場合は、必ずしもインターネットを介した通信を行う必要がない (図 1.7)。この考え方はエッジコンピューティング [26] やフォグコンピューティング [27] といった、インターネットやクラウドといった中央の計算資源ではなく、利用者側の計算資源を有効に活用しようとする新たなパラダイムであり、特にリアルタイム

ム性や現実空間とサイバー空間の融合が求められる IoT や VR 領域との親和性が高いことが示唆されている [28]. 更に, 「課題 B: センサデータ流通基盤の流通経路構築に関する課題」で述べたように, パーソナルデータを含むセンサデータを流通させることから, 利用者側の計算資源を有効活用し, 物理的にセンサデータの流通範囲を制限することが求められる. このような端末間の直接通信を実現する手法として Device-to-Device (D2D) ネットワークがある [29,30]. D2D ネットワークは基地局等のインフラを利用せずに利用者端末間で直接通信するネットワークである. しかし, 1.2.1 節で述べた目的の環境においては, 利用者は自身の持つ端末を含む汎用デバイスのみを用いて他の未知の参加者と直接接続し, 即時的にプライベートなセンサデータ流通基盤を構築してセンサデータを共有できる必要がある. しかし, 現状普及している D2D プロトコルである Bluetooth や Wi-Fi Direct [31] のみの利用では, 直接通信が可能な端末間によるコミュニケーションしかサポートされていないため, 任意のネットワークの構築および連携に制約がある. 以上から, 未知の汎用デバイスを用いるサービスに対しては, センサデータ流通基盤のプライベートな利用環境の構築が困難である.

本研究で目的とする環境においては, 汎用デバイスのみを用いて近隣に存在する未知のデバイスと事前の情報共有なしにネットワークを構築し, センサデータ流通基盤の利用環境を展開できる必要がある. そのため, 動的に近隣の参加者を発見し, 任意の端末と流動的に通信が可能なネットワークを構築する機構の実現が求められる.

1.2.3 本研究の位置付け

本研究の位置付けを, 1.1 節で述べた超スマート社会を実現するために必要とされる研究領域の観点から示す (図 1.8). まず, 超スマート社会実現のために必要とされるネットワーク技術として, 大量のセンサデバイスから獲得されるデータを流通させることが挙げられている. そこで, 本研究では, 汎用センサデバイスをアドホックに接続しながら

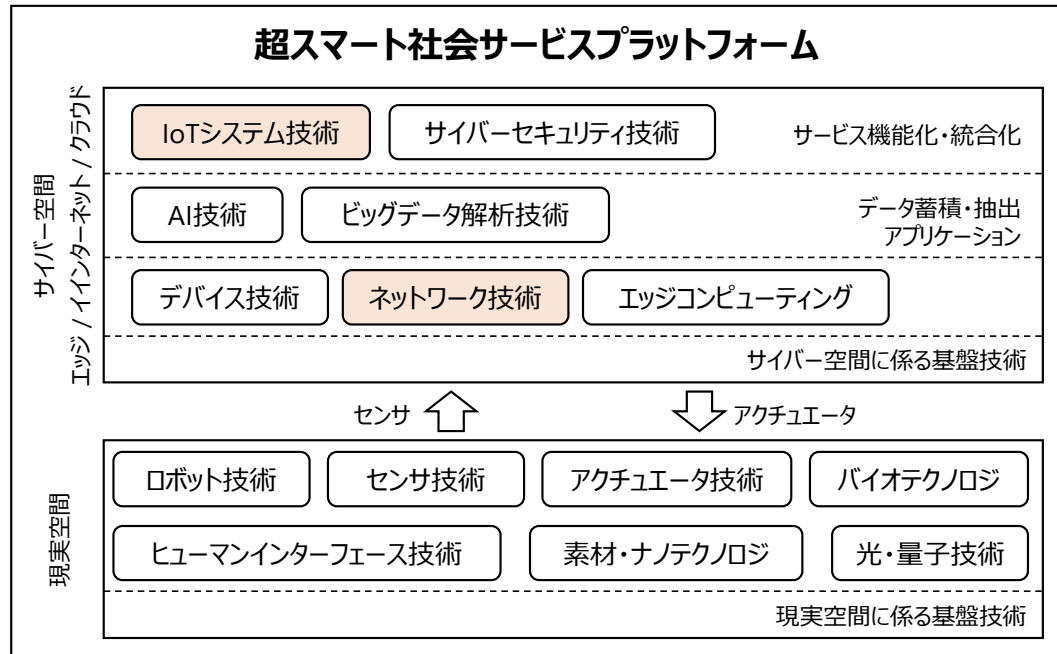


図 1.8 IoT 領域における本研究の位置付け

らも高度にセンサデータを流通するアプリケーションを構築可能なネットワーク技術の実現を目指す。また、超スマート社会実現のために必要とされる IoT システム構築技術として、ハードウェアやソフトウェアのコンポーネント化および大規模システムの構築・運用を支援することが挙げられている。そこで、本研究では、データ利用者の要求およびデータ提供者のポリシーに基づいて柔軟にセンサデバイスとアプリケーションが連携可能なサービス構成モデルの実現を目指す。なお、本研究で想定するアプリケーションは、センサデータの高度な集約や可視化を含んだ IoT システムではなく、センサデバイス間またはアプリケーション間でセンサデータを流通するのみのアプリケーション（センサ型アプリケーション）を想定する。すなわち、より高度な IoT システムを実現するためには、収集された多くのセンサデータをビッグデータとして扱い価値を創出するためのビッグデータ解析技術や AI 技術が必要とされるが、本研究ではそれらで用いるセンサデータを収集するためのネットワーク技術およびアプリケーション間の連携を可能とする IoT システム技術について焦点を当てる。

また、MANET の研究領域における本研究の位置付けを図 1.9 に示す。1.1.3 節で述べたように、PCN において、Participatory Sensing に基づくデータ共有基盤では、事前に

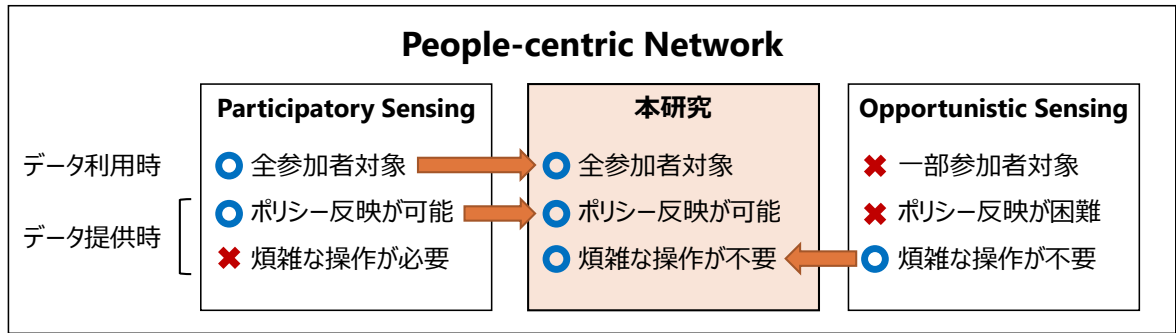


図 1.9 MANET 領域における本研究の位置付け

構築したシステムに利用者が“参加”するシステムモデルであり，全参加者とセンサデータを共有可能であり，明示的にセンサデータを提供するためポリシーの反映が可能である．しかし，ネットワークへの参加がデータ流通のトリガーとなるためセンサ型アプリケーションが乱立する未来社会においては，その利用に煩雑な操作が必要となる．また，Opportunistic Sensing に基づくデータ共有基盤では，利用者の移動による物理的な接近時の“機会的”な通信によって機能するシステムモデルであり，参加者による煩雑な操作が必要なく近隣利用者とのデータ共有が可能である．しかし，暗黙的にセンサデータを提供するためポリシーの反映が困難であるほか，限定的なネットワーク基盤を利用することから，全ての参加者を対象としたデータ流通が困難である．

そこで，本研究では，Participatory Sensing と Opportunistic Sensing の概念を統合し，新たなデータ流通モデルを創出する．具体的には，タスクの要求時には Participatory Sensing と同様に全参加者を対象として行い，他参加者からのタスクの承認およびセンサデータの提供には Opportunistic Sensing と同様に煩雑な操作が不要な受動的な手法を採用する．その際，Participatory Sensing におけるタスク承認のメカニズムを定式化することで承認を自動化し，受動的な要求の承認でありながら各参加者のプライバシーポリシーを反映可能とする．更に，この自動化によって利用者環境やポリシーの変化に即時的に対応できるようになるため，Participatory Sensing における反映をさらに高度化した柔軟なポリシー反映を可能にする．本研究の特色は，People-centric Sensing における 2 つの概念を発展的に統合し，より柔軟かつ高度なセンサデータの流通を煩雑な操作

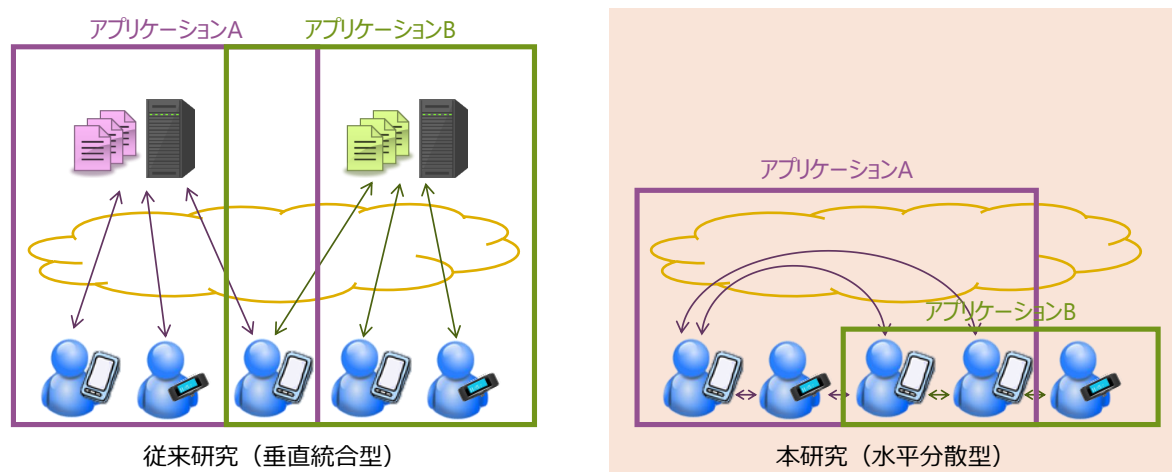


図 1.10 センサデータ流通領域における本研究の位置付け

無しに実現しようとする点にある。これにより、公共・個人所有の汎用センサデバイスから創出されるセンサデータの共有を、その所有者のポリシーや利用者の要求、環境の変化等に柔軟に対応可能な環境調和型のアプリケーションとして動的に構築できる。

また、センサデータ流通基盤の研究領域における本研究の位置付けを図 1.10 に示す。従来のセンサ型アプリケーションおよびセンサデータ流通基盤におけるシステム構成モデルでは、事前に構築したシステムおよびネットワークにセンサデバイスが接続する垂直統合型のシステム構成モデルとなっている。しかし、センサデバイスの今後の更なる普及やセンサ型アプリケーションへの要求の高度化・多様化が見込まれる IoT 社会において、それぞれの用途毎にあらかじめ専用のシステム・ネットワークを構築することには限界がある。

そこで、本研究では、構造化 P2P ネットワーク理論とエージェント理論を応用した自律分散型データ流通基盤の研究開発を行う。センサデータ流通基盤の実現のために構造化 P2P ネットワーク理論とエージェント理論を応用する試みはこれまで当該分野において前例がなく、独創的である。構造化 P2P ネットワーク理論の応用について、従来の PCN に基づいたセンサデータ流通基盤ではサーバやクラウドといった全体を集中管理するインフラに依存するサーバクライアント形式が一般的である。しかし、このモデルではデータの取扱いが所有者のポリシーに依らずに画一的である傾向がある他、データの流

通範囲を物理的に制限するといった個人化された流通設定を行うことには限界がある。一方で、管理体制が個々に分散された P2P 形式の本基盤では、クラウドに基づくビッグデータを利用するサービスモデルにおいて最近指摘されつつある、情報提供者のプライバシーの未考慮や公平な情報流通性の未確保等の問題について、本研究がその解決を与える可能性がある。そのため、本研究の社会的インパクトは非常に大きいと言える。また、エージェント理論の応用について、複数の IoT システムが混在する水平分散型システム構成モデルにおいては、センサデバイス間だけではなく、IoT システム間においても高度な連携が必要となる。そこで、各センサデバイスや IoT システムをエージェントと見做し、エージェント間の相互連携によってシステムの構築を目指すマルチエージェントシステム理論を応用する。学術的に有名なエージェント間協調プロトコルとしては 1980 年に提案された契約ネットプロトコル (CNP) があり、2002 年に FIPA によって標準化がなされている。CNP はこれまで協調プロトコルの代表例として、分散システムにおける負荷分散や、近年では経済学におけるメカニズムデザインにおける交渉モデルなど、様々な分野で導入が検討されてきた。本研究では、CNP の適用領域としてセンサデータ流通基盤を設定し、CNP を実用性、機能性、多様性などにおいて大幅に拡張することで諸問題の解決を目指す。これにより、CNP の潜在的能力の高さを検証し、分散システムの設計開発論としての学術的な貢献に寄与する。

1.3 本論文の構成

図 1.11 に本論文の構成を示す。本論文は全 5 章からなる。

第 1 章「序論」では、研究背景を述べた後、本研究の目的と課題を示した。

第 2 章「自律分散型 P2P 通信基盤」では、水平分散型のサービス構成モデルに基づくセンサデータ流通基盤の構築の実現のため、自律分散型 P2P 通信基盤 Waon を提案する。さらに、Waon の応用例として大規模災害時における安否情報共有システムを設計・実装し、不安定なネットワーク環境下における通信性能および機能多様性を検証する。

第 3 章「契約概念に基づくセンサデータ流通基盤」では、参加者のポリシーを考慮した

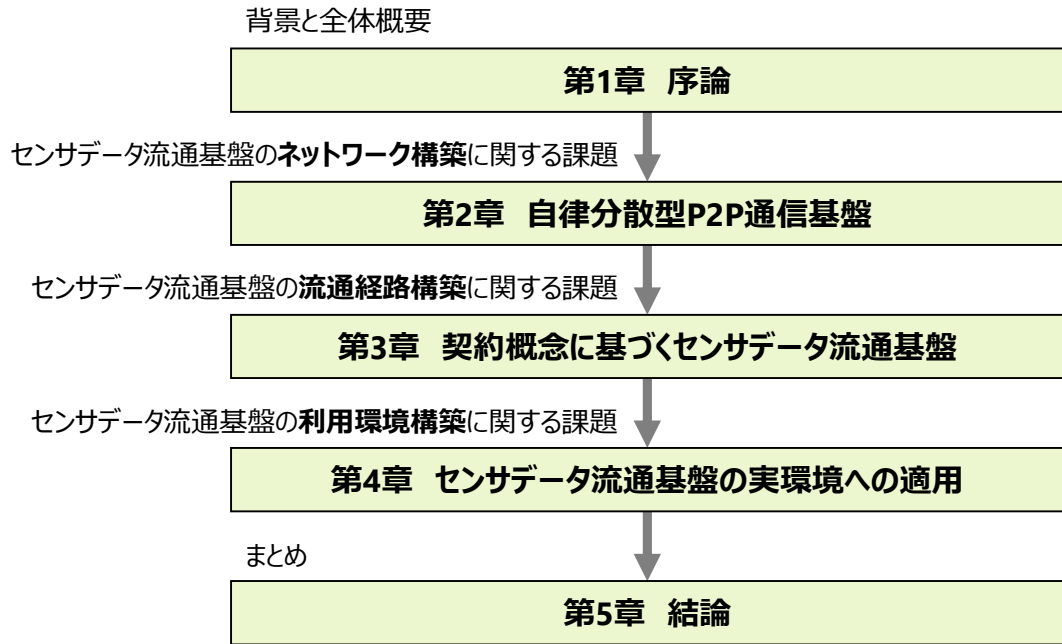


図 1.11 本論文の構成

IoT システム構築の実現のため、契約概念に基づくセンサデータ流通基盤 COSAP を提案する。また、その構成要素として動的なセンサ型アプリケーション構築のためのサービス構成モデルならびに情報流通プロトコル CIFP を設計し、シミュレーション評価によってその有効性を検証する。

第 4 章「センサデータ流通基盤の実環境への適用」では、センサデータ流通基盤のプライベートな利用環境構築の実現のため、ツリー型構造化 D2D 通信基盤 ICOS を提案する。その後、実端末を用いた D2D ネットワーク構築基盤の実装を通してその有効性を検証する。

第 5 章「結論」では、まとめとして研究成果を要約し、本研究の結論を述べ、今後の課題を挙げる。

第 2 章 自律分散型 P2P 通信基盤

2.1 はじめに

第 1 章で述べたように，将来の超スマート社会の実現のために，ネットワークを介して接続された多種多様な周囲のセンサデバイスおよび他の IoT システム間で高度に連携協調し，センサデータを横断的に活用して新しい価値やサービスを創出していくことが求められている．また，学術領域におけるセンサデータの利活用を目的としたネットワーク構築においては，あらかじめ存在が既知である専用のセンサデバイスのみの利活用モデル (WMS, WSN, ON) から，自動車や人物の持つ携帯端末といった存在が未知である汎用のセンサデバイスを含めた利活用モデル (VANET, PCN) へ関心がシフトしつつある．今後爆発的に普及が見込まれる IoT デバイスの全てを事前に把握しシステムへ把握することは現実的ではないため，特に人々の移動に伴う未知の携帯端末の出現・移動・消滅を許容する PCN が IoT 社会の実現に向けて親和性が高く，更なる研究開発の推進が求められている．

そこで，本章では，1.2.2 節で述べた「課題 A：センサデータ流通基盤のネットワーク構築に関する課題」の解決に取り組む．既存の PCN に基づく IoT システムのサービス構成モデルにおいては，事前に構築した独自のネットワークに対して端末所有者が能動的に参加することで IoT システムが機能する垂直統合型のシステム構成モデルとなっている．そのため，相互のシステム間およびネットワーク参加者間の連携はなく，それぞれのネットワーク内で流通するセンサデータの共有が困難である．また，所有者の意思の反映が困難な公共のセンサデバイスやロボット等に内蔵されたセンサデバイスについては，特定のネットワークへの参加を事前に設定すること，およびリアルタイムに判断する

ことが困難である．そのため，柔軟な接続先の IoT システムを変更や，IoT システム間ならびにセンサデバイス間で相互に連携可能な水平分散型のシステム構成モデルとして PCN を再構築し，それに伴って，センサデバイスの突然の参加および離脱を許容し，任意のセンサデバイス間で相互にコミュニケーションが可能な柔軟なネットワークアーキテクチャへ移行することが必要である．

このようにネットワーク環境が動的に変化する環境において安定したネットワークサービスを実現するためのネットワークアーキテクチャとして P2P ネットワークが有効である．P2P ネットワークは，そのネットワークに参加する各端末（ノード）が自律的に物理ネットワークとは異なる論理ネットワーク（オーバーレイネットワーク）を構築し，データを分散して管理するアーキテクチャである．このネットワークではサーバのような単一障害点は存在せず，通信やデータの管理を各ノードに分散させることによる高い拡張性と耐障害性を備えているため，前述した不安定なセンサデバイス間のネットワーク環境においても安定した IoT システムを構築可能である．そのため，本研究ではネットワークアーキテクチャとして P2P ネットワークを採用し，IoT 環境向けのセンサデータ流通基盤の実現に向けた通信基盤の構築を目指す．

P2P ネットワークは，非構造化 P2P ネットワークと構造化 P2P ネットワークに分類される．そのうち，構造化 P2P ネットワークは効率的なノード間通信が可能であり，ネットワーク上で管理されるデータ（コンテンツ）への到達可能性が高いため，本研究では構造化 P2P ネットワークに着目する．しかし，あらかじめノード間の接続関係を構造化して定義する必要があるため，新たなノードの参加や離脱といった環境の変化に柔軟に対応し，論理ネットワークの再構築や動的な負荷分散を実現することが困難である．また，これらの課題に着目した関連研究では，ネットワーク環境の変化やノードの性能に応じた動的な再構成アルゴリズムを実現するために，論理ネットワーク構造にいくつかの制限を設定する必要がある．この制限により，P2P ネットワーク上で展開される IoT システムの機能的多様性を達成することが困難である．特に，本研究で想定する IoT 環境においては，人々の持つウェアラブルデバイスやスマートフォンといった個人所有のセンサデバイスがノードの大半を占めるため，特定のノードに通信やコンテンツ管理を

集中させて電力消費量を増加させること、すなわち負荷を集中させてしまうことは、論理ネットワークの不安定性が増加するだけではなく、端末所有者のネットワーク参加への意欲を減衰させてしまう恐れがあるため、適切にノード間で負荷を分散し論理ネットワーク管理において均等に責任を追わせることが重要な要素となる。

そこで、本章では新たな構造化 P2P ネットワークとして「提案 A：自律分散型 P2P 通信基盤 Waon」を提案する。Waon (Well-distribution Algorithm for Overlay Network) は論理ネットワーク構成に制約を課すことなくネットワーク環境の変化やノードの性能差に応じて動的な負荷分散を実現する。また、論理ネットワークの再構築を必要とせずノード間の負荷分散を実行するため、論理ネットワークの再構築に必要だったノード間通信コストを削減する。さらに、Waon はノード間の物理的な位置関係を論理ネットワーク上に反映することが出来るため、物理的なネットワークトラフィックを削減する。これらの特徴により、不安定なネットワーク環境下における実用的な IoT システムの展開が可能になる。さらに、本章では、不安定なネットワーク環境下における性能を確認するため、Waon を大規模災害時における P2P 型安否情報共有システムに適用し、その機能性を検証する。

本章の構成は以下の通りである。2.1 節では、本章の概要について概説した。2.2 節では、P2P 通信基盤に関する既存研究について述べ、2.3 節で本研究で提案する P2P 通信基盤 Waon について述べる。その後、2.4 節では、Waon を用いた応用例として大規模災害時における安否情報共有システムを設計・実装し、2.5 節において Waon の性能と実装システムの有用性を示す。最後に、2.6 節で本章のまとめと今後の課題について述べる。

2.2 関連研究と課題

2.2.1 P2P ネットワーク

P2P ネットワークは、各ノードが中央サーバを必要とせずに同等の関係で通信する論理ネットワークであり、拡張性や耐故障性に優れるため、大規模災害時のような不安定なネットワーク環境における利活用に特に有効である。P2P ネットワークは、非構造化

P2P ネットワークと構造化 P2P ネットワークに分類される．非構造化 P2P ネットワークでは、各ノードは他ノードと自由に接続可能であるため、特に耐障害性が高く、ノード間の物理的な位置関係の反映や計算資源に応じた配置といった自由度の高いオーバーレイネットワークを構築可能である．しかし、非構造化 P2P ネットワークでは、そのネットワーク構成の自由度の高さの為に、他ノードやコンテンツの所在地を把握することが困難であるため、それらの検索にはフラッディングなどの非効率なルーティングプロトコルしか使用できないという課題がある．さらに、同様の理由から非構造化 P2P ネットワークではネットワーク上の他ノードやコンテンツへの到達可能性が保証されない．

一方、構造化 P2P ネットワークでは、各ノードはあらかじめ設定されたポリシーに基づいて他ノードと接続するため、他ノードやコンテンツの所在地を把握することが容易であり、それらへの到達可能性を保証する論理ネットワークを構築可能である．特に、分散ハッシュテーブル (Distributed Hash Table; DHT) を用いたネットワーク構築は構造化 P2P ネットワークにおいて最も有名なアルゴリズムであり、これまでに Chord [32], CAN [33], Pastry [34], Tapestry [35] など、DHT に基づく様々な構造化 P2P ネットワークが提案されている．DHT を用いたネットワークでは、ノードやコンテンツは IP アドレスやコンテンツ情報にハッシュ関数を適用して生成したハッシュ値を一意的識別子 ID として用いる．これらの ID は論理空間上に一様に分布するため、その分布に応じてノード間の接続関係やコンテンツの管理ノードを決定することで、ノード間の静的な負荷分散を実現する．また、対象の IP アドレスやコンテンツ情報が既知であればそれらのハッシュ値を計算することで論理ネットワーク上での所在地を知ることができ、ルーティングに必要な計算コストは $O(\log N)$ (N はノード数) に抑えることができるため、高い拡張性とコンテンツへの到達可能性を保証する．しかし、DHT を用いるとそのネットワーク構造は静的・固定的に決定されるため、環境の変化に応じた動的な負荷分散や論理ネットワークの再構築が困難である．また、ハッシュ化により論理ネットワーク上に分布されるノード情報やコンテンツ情報は失われるため、完全一致検索以外の検索機能の実現が困難である．

Mercury [36] は DHT を用いずにネットワークを構築することで動的な負荷分散を

実現する構造化 P2P ネットワークの一つである。Mercury では、負荷密度の低いノードを一度論理ネットワークから離脱させ、負荷密度の高いノードの隣に再加入させる leave-rejoin 法を用いることで、特定の端末へ負荷を集中させず、周囲の環境に応じた動的な負荷分散が可能である。また、DHT と比較してネットワーク構造への制限が少ないことから、コンテンツの属性ごとに柔軟な範囲検索が実現可能である。しかし、負荷分散を実行する度にノードが論理ネットワーク上で離脱と加入を繰り返すため、そのたびにネットワークの再構築が生じ、ネットワーク維持のための通信コストが増加するという問題がある。この問題は 1 章における個人所有の汎用センサデバイスを用いた利用環境においては特に重要な問題となる。

2.2.2 安否情報共有システム

日本は地震大国であり、これまで幾度となく通信インフラが長期間に渡って断絶する大規模災害に見舞われてきた。2011 年に発生した東日本大震災においては、Google Person Finder などの多くの種類のネットワークサービスが迅速に提供され、重要な情報を共有するために利用されたが、情報の信頼性を判断するメカニズムやシステムを稼働させるためのインフラの整備が必要であるという指摘がある [37]。特に、既存のシステムは既存の情報インフラストラクチャ上に提供されると仮定されているため、それらが破損した被災地における利用には限界がある。

このような背景から、大規模災害時における運用を想定した情報共有システムの研究が進められている。文献 [38] では、スマートフォン等の携帯端末間のすれ違い通信を用いることで災害情報を通信可能エリアまで効率的に伝送し、Google Person Finder や Twitter などの公衆サービスへ登録するシステムが提案されている。このシステムでは、医者やボランティア等が自身の携帯端末を持って移動し災害情報を伝搬することで、インターネットアクセスの断絶した地域の情報を収集する機能を実現している。しかし、公衆サービスやインターネットを利用している限り、こうして収集された災害情報に対して、それらを真に必要とする被災地の人々がアクセスすることは困難である。また、一般的な SNS では、目的の災害関連情報を的確に参照することが難しい点や、災害情報の中

に安否情報が含まれる場合は個人のプライバシーを考慮する必要があることなど、課題が多い。

一方、被災地での通信インフラに関しては、機器の障害により構成、機能、性能等が著しく変動し、利用者間のコミュニケーションに多大な影響を与えた。これに対し、スマートフォンや無線機器を用いたネットワーク構築技術 [39,40]、劣悪なネットワーク環境下における通信技術 [41]、DTN の対災害応用、メッシュ型無線ネットワーク構築基盤技術などの研究開発が進められている。これらの技術の進展により、地域のローカルネットワークが利用可能な状況となっていることを前提とした、サービス構成・提供技術の高度化が検討可能となっている。

2.2.3 関連研究における課題

本研究では、センサデバイスを構成要素とするセンサ型アプリケーションの柔軟な展開を実現可能な、センサデバイス間の P2P ネットワーク基盤を実現する必要がある。そこで、本章では以下の技術的課題を同時に満たす構造化 P2P ネットワークの提案を目指す。

- (R1)** ノードの突然の参加および離脱への対応：固定的に設置されるネットワーク機器だけではなく、個人所有の汎用センサデバイス等から構成されるネットワークにおいては、それらの物理的な移動および突然のネットワークからの離脱および再参加が頻発する可能性がある。そのため、それらを許容し参加デバイスのみでアプリケーションを維持可能な基盤を実現する必要がある。
- (R2)** アプリケーションの機能多様性の実現：(R1) の充足により不安定なネットワーク環境下においてもネットワークの維持が可能になった状況において、その上で展開されるアプリケーションには多様な機能性を持たせる必要がある。具体的には、P2P ネットワークにはサーバのような全体を管理する端末が不在であるため、他の参加端末の情報やネットワーク上で流通しているコンテンツを制約なく取得できる必要がある。
- (R3)** 動的なノード間の負荷分散：P2P ネットワークでは論理ネットワークの維持やコ

コンテンツの管理を個々の参加ノードで分担して請け負う構造となっている。この時、参加者の突然の参加および離脱が発生するとその端末が担当していたネットワークへアクセスが不能となることや、管理していたコンテンツが失われてしまうことが考えられる。そのため、(R1) を充足する環境においては、あらかじめあるノードに責任（負荷）を集中させることなく、一様にノード間で分散させることが望ましい。

既存研究においては、DHT に基づく Chord 等のネットワークでは、オーバーレイネットワークへ配置される際には静的に決定されるため、ノードやコンテンツの属性情報はオーバーレイネットワーク上では失われてしまう。この時の配置は固定的でもあるため、(R2) と (R3) を充足することが難しい。また、Mercury ではオーバーレイネットワークへの配置時の制約がないため、自由にノードやコンテンツの属性情報を保存したままオーバーレイネットワーク上に配置可能であるため、(R2) を充足する。しかし、あるノードに管理コンテンツが集中した場合にオーバーレイネットワークの再構築を行う必要があるため、(R3) を満たすがネットワークの維持コストの上昇は免れない。これは、個人所有のセンサデバイスを用いる環境においては消費電力等の観点から好ましくない。

2.3 Waon

2.3.1 概要

本章では、新たな構造化 P2P ネットワークとして Waon (Well-distribution Algorithm for Overlay Network) を提案する。構造化 P2P ネットワークは、主に高い通信効率や検索性能が要求される際に用いられるが、動的負荷分散実現のためにネットワーク構造が静的・固定的に決定される場合が多いため、機能の多様性を実現することが困難であった。具体的には、構造化 P2P ネットワークにおいては、ノード ID やコンテンツ ID に依らないハッシュ値等によるノード、コンテンツの配置を行うことで負荷分散を実現するため、本質的にノードの物理的な位置情報やコンテンツの意味情報などといった固有情報が失われる。従ってそれらの情報を利用することで実現されるアプリケーションレベ

ルの様々な機能，例えば地理範囲検索やコンテンツ範囲検索等の機能を提供することが困難であった．これに対し Waon では，論理ネットワーク構造に制限を加えることなく，ネットワーク環境の変動やノード間の性能差に応じて，ノードが自律的に動的負荷分散を行う．この手法では，ノードは論理ネットワークを再構築せずに動的負荷分散を実行するため，ネットワークの再構築に必要なコストを削減する．さらに，ノード間の物理的な近傍性を考慮したネットワークを構築するため，実際の伝送距離が短縮でき，不安定なネットワーク環境上においてネットワーク資源を効果的に利用可能となる．

Waon の特長は以下のとおりである．

- (C1) 拡張性に優れた構造化 P2P ネットワーク：Waon におけるノードやコンテンツの検索にかかる処理数は $O(\log N)$ である．これは Chord# [42] で用いられているノード間のホップ数に基づくルーティングテーブルを用いることによって実現する．
- (C2) 範囲検索などの柔軟な検索機能：コンテンツの ID 空間上の位置に制限を設けないため，コンテンツ名の順序関係を保存した状態でネットワーク上に配置することができる．そのため，コンテンツの範囲検索だけではなく，複数条件による検索ができる．
- (C3) 通信コストの増加を防ぐ動的負荷分散手法：動的負荷分散ではノードにかかる負荷に応じて ID 空間上のノード位置を変更し，管理コンテンツ数と通信コストの分散を実現する．このとき，論理ネットワークの構造を一切変更することなく負荷を分散することで，論理ネットワークの再構築などに伴う通信コストの増加を抑制する．
- (C4) 物理ネットワークのトラフィックを減少：Waon ではノードの ID 空間上の位置に制限を設けないため，ノードの物理的な近傍性を考慮した論理ネットワークを構築できる．また，そのネットワークは動的負荷分散の実行で再構築されることはないため，ノード間の物理的な関係性を論理ネットワーク上に保存できる．

これらの特長のうち，特長 (C1) によって課題 (R1) を，(C2) によって (R2) を，

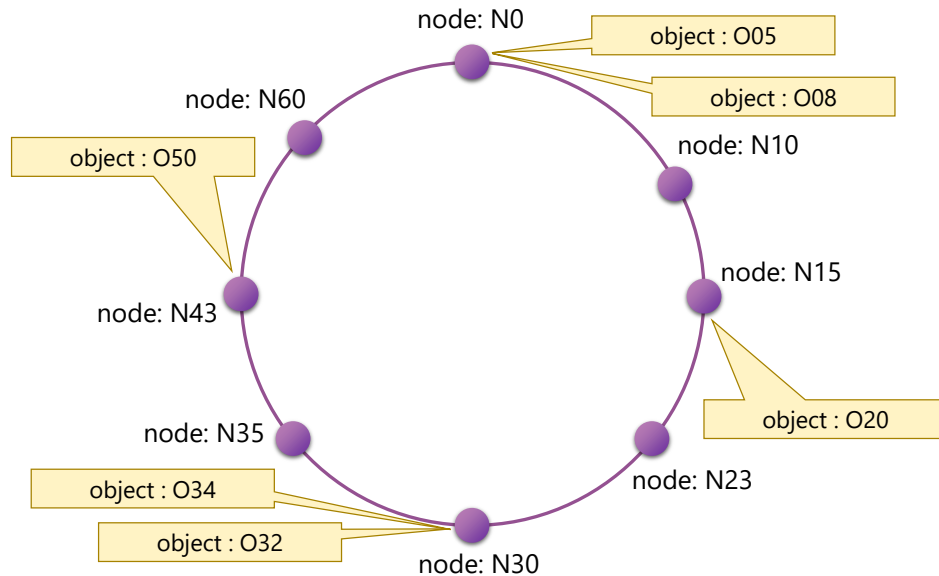


図 2.1 ネットワーク構造

(C3) によって (R3) を、それぞれ解決する。加えて、(C3) と (C4) によって、Mercury の問題であった通信コストの増加を防ぎ、不安定なネットワーク環境下において限られた資源の有効な利用が期待でき、(R3) をより効果的に解決することが可能である。

2.3.2 ネットワーク構造

Waon では、Chord と同様にリング状の ID 空間を用いる。Waon における全てのノードとコンテンツはこの ID 空間上に配置され、その位置関係に基づいたリング状の論理ネットワークを構築する (図 2.1)。また、コンテンツのノードへの割り当ても ID 空間上の位置関係に基づいて決定される。具体的には、それぞれのノードは、自身のノード ID から順方向に最近隣のノード ID までの ID 空間を自身の管理領域とし、その領域に含まれる ID を持つコンテンツを管理する。Waon も Mercury と同様に DHT と比較してネットワーク構造への制限が少なく、ノード ID の変更によってリングネットワーク上のノードの位置を自由に変更可能である。そのため、環境の変化に応じて自身の管理領域を増減させることで動的な負荷分散を実現する。また、コンテンツ ID の割り当ても自由に行うことが可能であり、コンテンツの属性値に応じてあらかじめ配置場所を決定しておくことで、それらの範囲検索やあいまい検索といったより高度な検索機能の実現が可

能である.

Waon におけるノードは以下の要素によって構成される.

```
node.id           := INTEGER
node.successor    := {node[0], node[1], ..., node[r - 1]}
node.predecessor  := {node[0], node[1], ..., node[r - 1]}
node.route        := {node[0], node[1], ..., node[log N - 1]}
node.object       := {object[0], object[1], ...}
```

ここで, r はリングネットワークを構築する経路表のエントリー数, N はネットワーク全体のノード数である. 通常, r は 2 以上 $\log N$ 以下の値をとる.

リングネットワーク上での各ノードの位置は, それらに割り当てられる一意の id ($0 \leq \text{id} < 2^M$) によって決まり, 負荷分散の実行時には動的に変更ができる. 各ノードは, 自身の **successor** ノードとして, 自身より順方向側に位置する r 台のノードとのリンクを, また, 自身の **predecessor** ノードとして, 自身より逆方向側に位置する r 台のノードとのリンクを, それぞれ保持する. これらのリンクはリングネットワークを維持するために用いられる近距離用リンクであり, 他のノードのリングネットワークへの参加や離脱を検出するために定期的に更新される. また, 近距離用リンクとは別に, 各ノードは **route** として, ノード間のホップ数に基づいた経路表を構築する. 具体的には, 自身から順方向側に 2^n ($n = 0, 1, 2, \dots, \log N - 1$) だけ離れたノードとのリンクを保持する. この経路表は $O(\log N)$ の通信効率を実現する遠距離用リンクであり, 近距離用リンクと同様に定期的に更新される. **object** はノードが管理しているコンテンツである.

一例として, 図 2.1 における N30 の要素を示す. なお, $r = 2$ とする.

```
N30.id           := 30
N30.successor    := {N35, N43}
N30.predecessor  := {N23, N15}
N30.route        := {N35, N43, N0}
N30.object       := {032, 034}
```

2.3.3 経路表の更新

ノードが定期的に実施する経路表の更新では, まず, 他ノードの Waon ネットワークへの参加および離脱を検出するために, 自身の近距離用リンクを更新する. 図 2.2 に,

```

1: function UPDATENEIGHBORINGNODES(n, r, interval, currentTime)
2:   for i=0 until i<r do
3:     if n.successor[i].timestamp + interval < currentTime then
4:       n.successor[i].addNeighboringNodes(n)
5:       n.addNeighboringNodes(n.successor[i].successor)
6:       n.addNeighboringNodes(n.successor[i].predecessor)
7:     end if
8:     if n.predecessor[i].timestamp + interval < currentTime then
9:       n.predecessor[i].addNeighboringNodes(n)
10:      n.addNeighboringNodes(n.predecessor[i].successor)
11:      n.addNeighboringNodes(n.predecessor[i].predecessor)
12:    end if
13:  end for
14: end function

```

図 2.2 近距離用リンク更新の擬似コード

近距離用リンクを更新するための擬似コードを示す。ここで、`addNeighboringNodes` 関数では、引数として渡されたノード情報を、論理ネットワーク上の位置関係に基づいて `successor` あるいは `predecessor` として追加し、タイムスタンプを更新する。なお、Waon では、隣接ノードの持つ近距離用リンクは大部分が重複するため、少ないノードとの通信のみで経路表を保つことが可能である（図 2.2 の 3 行目および 8 行目を参照）。

近距離用リンクを更新した後、各ノードは遠距離用リンクを更新する。図 2.3 に、遠距離用リンクを更新するための擬似コードを示す。この時、応答のないノードを発見した場合は、そのノードよりも遠い位置のノードに関する情報を `route` から `remove` 関数により削除する（10 行目）。これは `route` がノード間の相対的な位置関係に基づいた経路表であるためであり、これにより一時的に遠距離のノードへのリンクは失われるが、リングネットワークが分断されない限り近距離用リンクの遷移によりノードや安否情報への

```

1: function UPDATEROUTE(n)
2:   node = n.successor[0]
3:   distance = 0
4:   for i=0 until distance<distance(node.id, n.id) do
5:     n.route[i] = node
6:     distance = distance(node.id, n.id)
7:     node = n.route[i].route[i]
8:     i = i + 1
9:   end for
10:  n.route.remove(i)
11: end function

```

図 2.3 遠距離用リンク更新の擬似コード

到達可能性は保証される．なお，`distance` 関数は ID 空間上における各 ID 間の距離を返す関数であり，以下の式で表される．

$$\text{distance}(\text{id}_1, \text{id}_2) = \begin{cases} \text{id}_1 - \text{id}_2 & (\text{id}_1 > \text{id}_2) \\ \text{id}_1 - \text{id}_2 + 2^M & (\text{id}_1 \leq \text{id}_2) \end{cases}$$

2.3.4 動的負荷分散

Waon ではリングネットワーク上の平均負荷を推定し，過負荷ノードの持つコンテンツを他ノードに譲渡することで動的な負荷分散を実現する．

Waon の重要な特徴は，ノードの遠距離用リンクの更新と同時にリングネットワークの平均負荷を推定できることである．図 2.4 に，遠距離用リンクを更新および平均負荷推定の擬似コードを示す（下線部が図 2.3 からの追加部分）．`n.calculateLoad(node)` 関数では，ノード `n` からノード `node` の直前までの全てのノードにかかる総負荷を返す．すなわち，`n.calculateLoad(n.successor[0])` では `n` のみにかかる負荷を返し，`n.route[2].calculateLoad(n.route[3])` では `n.route[2]` から `successor` 方向に

```

1: function UPDATEROUTE(n)
2:   node = n.successor[0]
3:   load = n.calculateLoad(node)
4:   distance = 0
5:   for i=0 until distance<distance(node.id, n.id) do
6:     n.route[i] = node
7:     distance = distance(node.id, n.id)
8:     node = n.route[i].route[i]
9:     load = load + n.route[i].calculateLoad(node)
10:    i = i + 1
11:  end for
12:  n.route.remove(i)
13:  averageLoad = load / 2^n.route.length()
14: end function

```

図 2.4 平均負荷推定の擬似コード

4 台分の負荷の和を返す。この時、`n.route[2]` のノードは自身の経路表を更新する際に `n.route[3]` のノード（すなわち `n.route[2].route[2]`）までのノードが管理している負荷の和をあらかじめ計算して保持しているため、他ノードへ問い合わせる必要はない。なお、`n.route.length` 関数はノード `n` の保持する `route` のエントリー数を返す。すなわち、ネットワークが安定状態の場合は $\log N$ を返す（ N はネットワーク全体のノード数）。

ネットワークの平均負荷を推定後、Waon では過負荷ノードの持つコンテンツを他ノードに譲渡することで動的な負荷分散を実現する。図 2.5 に動的負荷分散の概要を、図 2.6 に擬似コードを示す。`updateLocation` 関数では、まず、(1) あらかじめ得られた平均負荷と自身にかかる負荷を比較し、自身が過負荷ノードであるかの判定を行う（2 行目–3 行目）。もし自身が過負荷ノードであれば、(2) `shortenManagementArea` 関数により自身の負荷が平均負荷付近となることが見込まれるよう管理領域を狭め、自身の `id` を変更する

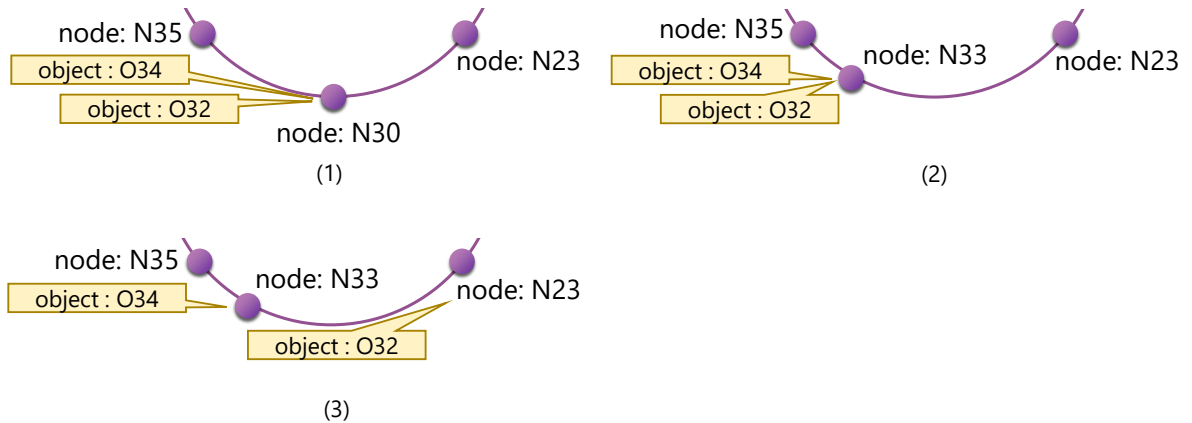


図 2.5 動的負荷分散の概要

```

1: function UPDATELOCATION(n, averageLoad)
2:   overLoad = n.calculateLoad(n.successor[0]) - averageLoad
3:   if overLoad > 0.0 then
4:     num = n.shortenManagementArea(overLoad)
5:     for i=0 to num-1 do
6:       n.predecessor[0].addObject(n.object[i])
7:       n.removeObject(n.object[i])
8:     end for
9:   end if
10: end function

```

図 2.6 動的負荷分散の擬似コード

ことでリングネットワーク上の位置を変更する（4 行目）。その後，(3) ノード位置の変更によって管理する必要のなくなったコンテンツを `addObject` 関数および `removeObject` 関数によって近隣ノードに対して譲渡する（5 行目–8 行目）。図 2.5 より，動的負荷分散が行われてもノードの並び順は変わらず，それによりそれぞれのノードの経路表を更新する必要がないことが分かる。また，平均負荷の推定に必要な通信は，ネットワークの維

持に必要な経路表の更新と同時に行うことが可能であり、負荷分散の実行にあたって通信コストが増加することはない。関連研究における他の構造化 P2P ネットワークの多くは、ネットワーク環境の変化やノードの性能差に応じて動的負荷分散を実行する際、これらの経路表の再構築や、通信で用いる経路表以外の情報の管理を行う必要がある。しかし Waon では、動的負荷分散のために経路表以外の情報の交換、経路表の更新を必要とせず、必要最低限の通信のみでネットワークサービスの機能を実現する。

2.4 Waon に基づく P2P 型安否情報共有システム

2.4.1 概要

本研究では、Waon の応用例の一つとして、大規模災害時を想定した P2P 型安否情報共有システムを提案する。その理由として、1 章で述べた個人所有の端末で構成される利用環境が類似していることと、2.2.3 節で述べたように災害時における情報共有システムとして P2P ネットワークが有用とされているためである。本システムの主な利用者は、被災地における地方自治体を想定し、自治体間の通信基盤は予め利用可能であることを前提とする。すなわち、災害発生後にはクラウド上などのサーバを利用せず、自治体間で、既知の残存機器により、アプリケーションレベルでの論理ネットワークを構成する。こうすることで、信頼性の高い安否情報のみを、被災者のプライバシーを考慮した上で共有する。

情報共有システムのアーキテクチャとしては、情報共有の効率化の観点から、クラウドのサーバ上に情報を配置してクライアントから参照するサーバ・クライアント型での構成が一般的である。しかしながら、被災地における情報利用に十分配慮しつつ、構成、機能、性能等が不安定なネットワーク環境上で、可能な限り安定した広範なサービスを提供する必要があることから、2.2.3 節で述べた課題を継承した以下の要件を満たすシステムとする必要がある。

(R1') 被災を免れた稼働可能なノードのみで安否情報の共有：インターネットが利用できない状況において、被災を免れた稼働可能な残存機器のみによって、地域のロー

カルネットワークを利用して災害対応の論理ネットワークを即時的に構築する。その上で必要最低限の災害関連情報のみを被災者間で共有する仕組みを提供する必要がある。

(R2') 個人の安否情報に加え、避難者数や避難所の利用状況等の集計情報を共有：(R1')を充足することにより論理ネットワーク上のノードに安否情報が分散配置され、それによる副作用として各種情報の集計が困難となることが予想される。従って安否情報が分散配置される場合でも、特定個人の安否情報の検索のほか、避難者総数、特定条件に適合する避難者の数、避難所の利用状況等、集計情報を容易に把握することが可能な仕組みを提供する必要がある。

(R3') 特定のノードに負荷を集中させず、被災状況とその変化に応じた負荷分散：文献 [43,44] では、あらかじめ構築したネットワーク上における災害情報共有システムが提案されている。これらのシステムでは、サーバの役割を担うネットワーク機器が情報を集約して配布することで利用者間での災害情報の共有を実現している。しかしながら、計算機・ネットワーク環境が急激に変化する大規模災害時には、電力供給の遮断等によるサーバの突然の停止、サーバアクセスのためのネットワークの切断や負荷集中等により、サービス利用が不可能となる場合がある。これは、災害時に残存した機器を用いてサーバを臨時に構築する場合でも、被災地の不安定なインフラ状況から同様のことが言える。従って、特定ノードに負荷を集中させず、被災エリアの違いによる被害の偏りや被災後の時間的な経過による状況変化に柔軟に対応して、動的に負荷を分散させる仕組みを提供する必要がある。

これらの要件に対し、Waon に基づく P2P 型安否情報共有システムでは以下の機能により各要件を充足する。

1. Waon は、他ノードのよるネットワークへの突然の参加および離脱を検出し動的に論理ネットワークを構築することができる。したがって、(R1') を充足し残存機器のみを用いた中断のないサービスを提供することができる。
2. Waon は、リングネットワーク上に制約なくコンテンツを配置することができる。

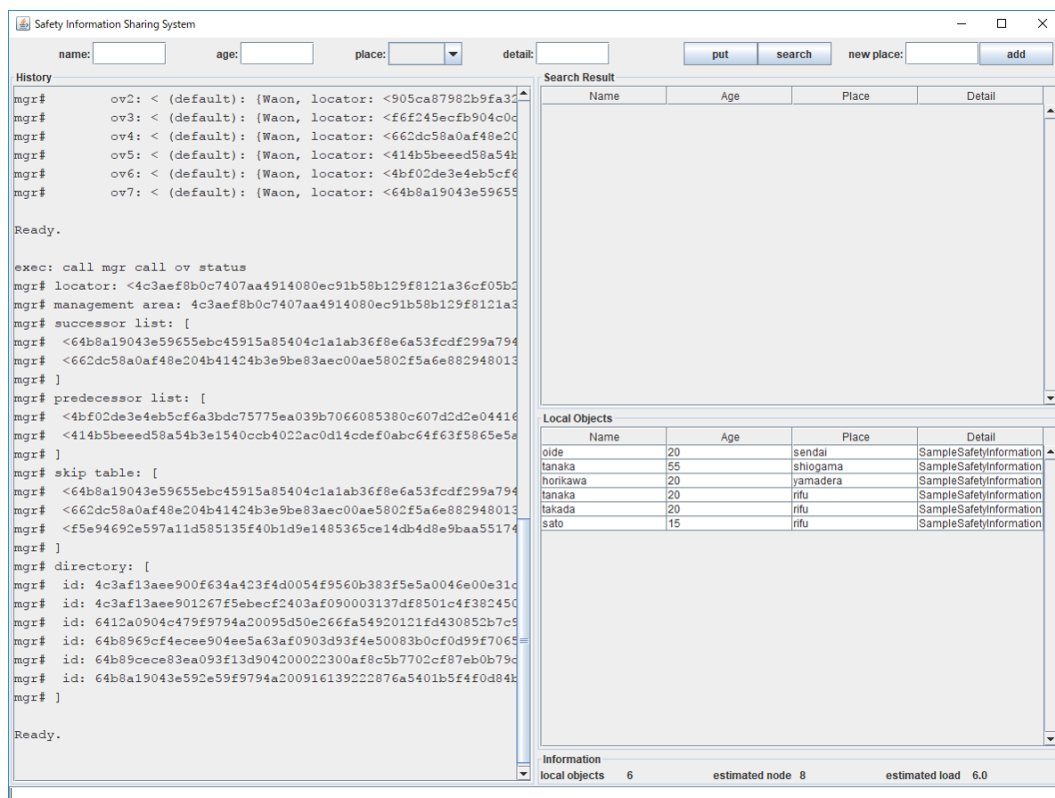


図 2.7 P2P 型安否情報共有システム

そのため、情報の種類や情報の発生場所に応じてコンテンツをまとめて配置し、それらを範囲検索により一括で取得することができる。したがって、(R2')を充足し柔軟なサービス機能を提供することができる。

3. Waon は、動的負荷分散の実行に通信コストの増加を必要としない。そのため、通信環境が不安定で通信資源が限定された状況においてもノード間の負荷の調整が可能である。しかがって、(R3')を充足し状況に応じて適切にノード負荷を分散させることができる。

本システムは、Waon をネットワーク通信基盤として用いることで、動作可能なノードのみで論理ネットワークを構成し、その上で安否情報を共有する。安否情報には避難者の氏名、年齢、避難場所などの情報を含み、利用者は複数条件により安否情報の検索ができる。各ノードが保持する安否情報は、ネットワーク環境やノード間の性能差に応じて動的に複製・分散配置され、自律的な負荷分散を実現する。

図 2.7 に実装した P2P 型安否情報共有システムを示す。本システムによって共有される安否情報には、名前、年齢、避難場所を検索キーに指定できる。GUI 左部にはリングネットワークの状況、右部には安否情報のリストがそれぞれ表示される。

2.4.2 ノードの動作

ノードの参加

ノードがリングネットワークに参加する際は、あらかじめそのネットワークに参加しているノード（紹介ノード）と通信可能である必要がある。そのため、本システムではあらかじめシステムを利用する地方自治体同士のノードの IP アドレスは既知であるものとする。ノードの参加時には紹介ノードと近隣ノード情報を交換し、割り当てられたノード ID に従って、2.3.3 節で述べた手法を用いて自身の近隣ノード情報が得られるまで問い合わせを再帰的に実行して近距離用リンクの更新を行う。この期間中はリングネットワーク上に正しく配置されておらず自身の管理領域が決定していないため、参加ノードは他ノードから送られてきた安否情報に関するリクエストを全て破棄する。近隣ノード情報が得られた参加ノードは、その時点から他ノードからの安否情報に関するリクエストに応じるものとし、順次自身の遠距離用リンクの更新を行う。

Waon では、一度構築されたリングネットワークはノードの参加や離脱がない限り再構築はされない。そのため、本システムにおけるノードの順序関係においても、頻繁に通信を行う必要のある近隣ノードとは物理的なネットワーク上でも近接していることが望ましい。近年、物理的な近傍性を考慮したネットワークの構築手法として、GPS を用いる手法やランドマーク法 [45] を用いる手法などが提案されている。そこで、本システムにおいてもそれらの手法を導入しノード ID を決定することで物理的な近傍性を考慮したリングネットワークの構築を行う。これにより、通信の物理的な通信路を短縮することができ、大規模災害時における限られたネットワーク資源を有効に使うことができる。

ノードの離脱

ノードがリングネットワーク上から離脱する際は、それまでに管理していた全ての安否情報を自身の直近の predecessor に譲渡した後に離脱を行う。不安定なネットワーク環境によって突然ノードが離脱した場合は predecessor に安否情報を譲渡することなく離脱してしまうが、安否情報は 2.4.3 節で述べるように定期的に複製が他ノードにより生成されるため、安否情報がリングネットワーク上から失われてしまう可能性を低減する。

2.4.3 コンテンツの流通

安否情報の追加

本システムで流通する安否情報の構造を以下のように定義した。

```
object.id      := INTEGER
object.name    := STRING
object.age     := INTEGER
object.place   := STRING
object.detail  := STRING
```

ここで、name, age, detail はそれぞれ避難者の氏名、年齢、詳細情報であり、place には避難所の情報を格納する。安否情報の ID は name, age, place を元に複数生成され、それらは安否情報の複製を配置する際に用いられる。

リングネットワーク上への安否情報の追加登録は、避難者の氏名、年齢、避難場所、詳細情報を入力することで行う。このとき、あらかじめ設定してある登録者情報が自動的に付加される。追加された安否情報は、与えられたコンテンツ ID に基づいて決定された 1 台のノードによって管理されるが、不安定なネットワーク環境下ではそのノードが突然ネットワークから遮断されてしまうことを考慮する必要がある。そのため、安否情報の追加の際には自動でその安否情報の複製を生成し、リングネットワーク上の異なる場所へ配置する。具体的には、図 2.8 に示すように、リング状の ID 空間を 3 つに分割し、それぞれの ID 空間上で、避難者の氏名、年齢、避難場所のそれぞれの情報をもとに生成した ID を割り当てて追加を行う。こうすることで、ノードの突然の離脱によって安否情報が失われてしまう可能性は低くなる。また、本システムのノード ID の割り当てには物理

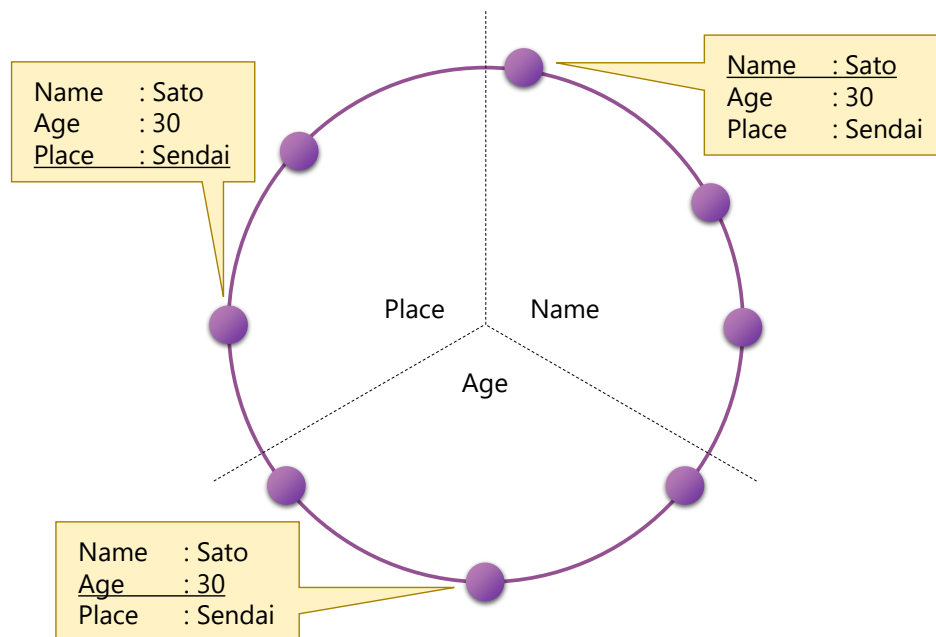


図 2.8 複製の生成

的な近傍性を考慮することができる。そのため、同一の情報をリングネットワーク上の離れた位置に分散配置させることによって、ネットワーク環境が不安定な被災地から追加された安否情報を、ネットワーク環境が比較的安定している被災地外のノードへ素早く拡散させる効果が期待できる。なお、ID 空間の分割数を 3 としたのは、安否情報の範囲検索を避難者の氏名、年齢、避難場所のそれぞれの属性ごとに実行できるようにするためである。それぞれの ID 空間では、各属性について前後関係が保存されて安否情報が配置される。そのため、目的の属性の ID 空間に向けて範囲検索を実行することで、属性ごとの範囲検索が可能となる。

安否情報の削除

登録された安否情報の削除は、登録時に付加された登録者情報を入力することで行う。本システムでは一度離脱したノードが保持していた安否情報が再加入時に再びネットワーク上に拡散されることや、複製機能の実行などによって一度登録された安否情報が定期的に拡散されることから、安否情報を削除機能の実行によって完全にネットワーク上から消滅させることは困難である。これは、本システムが大規模災害時における安否情報の拡散を想定した際の、迅速な安否情報の共有を目的としているためである。ただ

し、東日本大震災の際に実際に用いられた公衆サービスベースの支援システムの多くと異なり、本システムでは、当事者のノードのみで構成されるプライベートなネットワーク上でのみ安否情報を扱う。そのため、安否情報が不特定多数の人々によって必要以上に長期間閲覧されることはなく、一定のレベルでのプライバシーの保護を実現する。

安否情報の検索

本システムでは、安否情報の範囲検索と、複数条件による検索を実現する。範囲検索については、本システムではコンテンツ同士の前後関係が保存されたままリングネットワーク上に配置されるため、類似する属性値を持つ安否情報同士が隣り合って配置されることになる。そのため、遠距離用リンクである `route` を用いて範囲検索の始点となるノードを検索し、そのノードから近距離用リンクである `successor` を用いて範囲検索の終点となるノードまでを辿ることで、範囲内に含まれる全ての安否情報を取得する。また、複数条件による検索では、1つの条件に対して範囲検索を実行し、得られた結果から残りの条件にも一致する安否情報のみを抽出することで実現する。これらの検索機能は、コンテンツ ID の生成にハッシュ関数を用いる従来の構造化 P2P ネットワークでは実現が困難であるが、Waon においてはコンテンツ ID の割り当てを自由に行うことができるため、範囲検索などの柔軟な機能を実現することが可能である。

図 2.9 にコンテンツの検索機能の擬似コードを示す。ここで、`routing(id)` 関数は、遠距離用リンク `route` による問い合わせを繰り返し、引数の `id` を管理領域とするノードの検索を行う。また、`getObject` 関数は、管理する安否情報から、引数の範囲内の ID を持つ全ての安否情報を返す。

範囲検索の実現によって、本システムでは安否情報の効率的な検索だけではなく、避難所における避難者の受け入れ状況を知ることができる。また、管理している安否情報や検索して得られた安否情報から自動的に避難所の情報を取得してリスト化する。このリストから避難所を選択して範囲検索を実行することで、その避難所に避難している被災者の情報を一括して検索できる。この検索結果を参照することで、その避難所における避難者の人数や年齢分布が把握でき、避難者の受け入れ先の検討や支援物資の分配の際

```
1: function SEARCHOBJECTS(n, fromId, toId)
2:   result = NULL
3:   target = n.routing(fromId)
4:   repeat
5:     result = result + target.getObjects(fromId, toId)
6:     target = target.successor[0]
7:   until distance(toId, fromId) ≥ distance(target.Id, fromId)
8:   return result
9: end function
```

図 2.9 コンテンツ検索の擬似コード

に役立てることが期待できる。

2.4.4 ネットワークの維持

経路表の更新

リングネットワークに参加するノードは、定期的に自身の近距離用リンクを更新し、他ノードの参加や離脱の検出を行う。具体的には、自身の近隣ノードと近距離用リンクの情報を交換し、その中に新たなノード情報が含まれていた場合はネットワークに参加したノードとして経路表に追加する。また、応答のない近隣ノードを検出した場合はネットワークから離脱したノードとして経路表から削除する。この動作は、ノード単位で参加や離脱が行われた際はもちろん、ネットワークレベルで分断や統合が行われた際にも同様に実行される。

負荷の分散

本システムにおける負荷値の定義は、管理している安否情報の数とする。その理由は、全ての安否情報はその利用法の性質上、ネットワーク上から等しく参照されるとみなせ

ること、および、安否情報 1 つあたりの容量は小さく個体差はないと判断できるためである。そのため、動的負荷分散が実行されネットワークが安定した状態では、全てのノードがネットワーク全体の安否情報を等しく分配しているとみなすことができ、ネットワークを構成しているノード数や、ネットワーク上に登録されている安否情報の総数の推定を行うことができる。また、これにより 2.4.3 節で述べた安否情報の複製は、それぞれ異なるノードによって管理されることが期待できる。そのため、動的負荷分散の実行によって安定したネットワークを維持するだけではなく、システムの信頼性を向上させる。

複製の作成

不安定なネットワーク環境では、あるノードが突然ネットワークから離脱すると、他ノードはそのノードが管理していた安否情報を参照することができない。そこで、各ノードは定期的に自身の管理する安否情報の複製を作成し、他ノードへ管理を依頼する。この時、複製頻度が高いと安否情報への到達可能性が向上するが、ネットワークの維持コストが増加しネットワーク資源の消費を招く。

安否情報の複製では、自身の管理する安否情報の 3 属性それぞれからコンテンツ ID を生成し、ネットワーク上に再配置する。2.4.3 節で示したように、3 属性それぞれから生成したコンテンツ ID はリングネットワーク上に分散して配置されることになるため、被災地で生成された安否情報を地理的に離れた場所のノードに管理を依頼することが期待できる。なお、同一の安否情報を持つ 3 台のノードが一斉にネットワークから離脱した際はその安否情報が失われてしまうことになるが、本システムでは少なくとも 1 台のノードは地理的に離れた場所のノードであり被害を免れることが期待できるため、情報損失の確率は低いと考えられる。

2.5 評価

2.5.1 Waon の性能評価

動的な負荷分散を実現する Waon と Mercury それぞれのアルゴリズムについて、その特性を評価するための評価実験を行った。比較対象のアルゴリズムとして Mercury を選んだ理由は、Random Sampling によってランダムに選択したノードから負荷値を収集し、今回の提案における Waon と同様にネットワーク全体から平均負荷値を推定する手法を採用しているためである。Mercury に与えるパラメータは文献に則り $k = 4$, $k_1 = 4$, $k_2 = 4$, $d = 3$, $\alpha = \sqrt{2}$ とした。ただし、両アルゴリズムともにコンテンツの複製は作成しないものとし、Mercury における hub の数は 1 とした。

本実験では 16 台のノードを起動してネットワークを生成し、ノードとコンテンツに与える ID 長は 40 バイト ($0 \leq id < 2^{320}$)、近距離用リンクの最大エントリー数は $r = 2$ とした。動的負荷分散の評価には Fairness Index (FI) [46] の値を用いた。Fairness Index はオブジェクト間の公平性を評価する $1/N$ から 1.0 までの指標であり (N は全体のノード数)、以下の式によって算出される。

$$FI(x_1, x_2, \dots, x_N) = \frac{(\sum x_i)^2}{N \sum x_i^2}$$

また、動的負荷分散の実行 1 回を 1 step とし、ノードは以下の動作をすることとした。なお、本実験における安否情報は偏った文字列の安否情報が登録される状況を考慮し、ランダムに生成した偏った文字列から ID を生成した。

steps 1–5 ネットワークが安定するまで待機する

step 6 ID を偏らせて生成した安否情報を 200 個配置する

steps 7–40 ネットワークが安定するまで待機する

図 2.10 に各アルゴリズムの動的負荷分散の評価値を、図 2.11 にノード間で通信されたメッセージ量を示す。結果より、Waon の動的負荷分散は収束までに時間を要するが、ネットワークの再構築が不要であるためにノード間で交わされるメッセージ量がほとんど増加しないことを確認した。一方、Mercury の動的負荷分散は Waon よりも早く収束

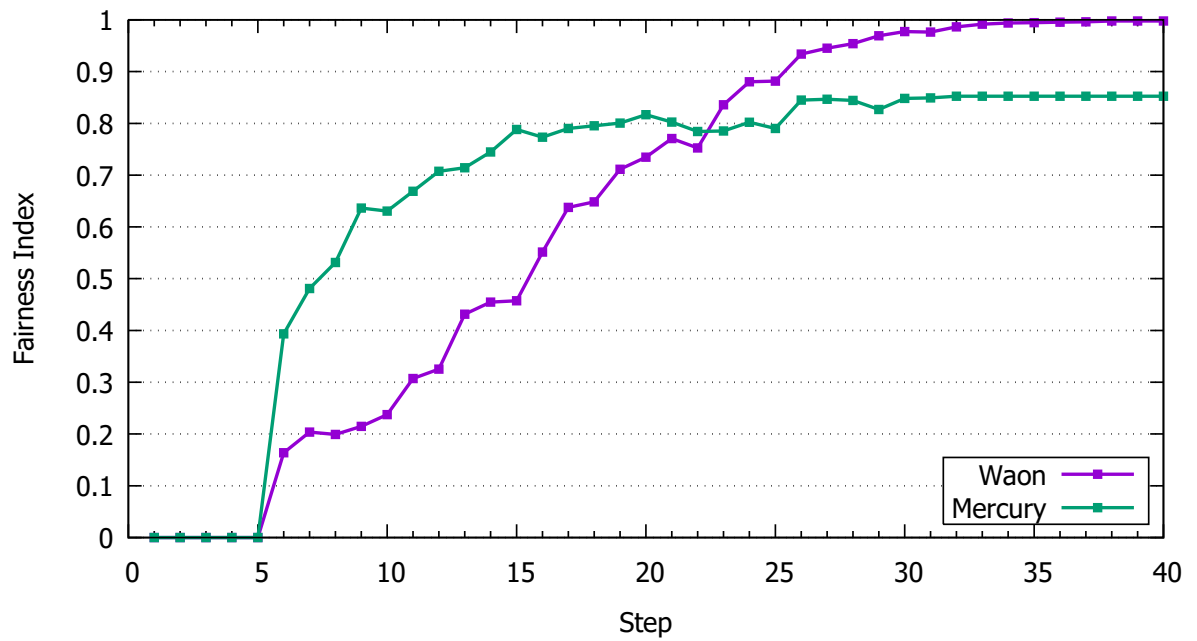


図 2.10 Fairness Index の推移

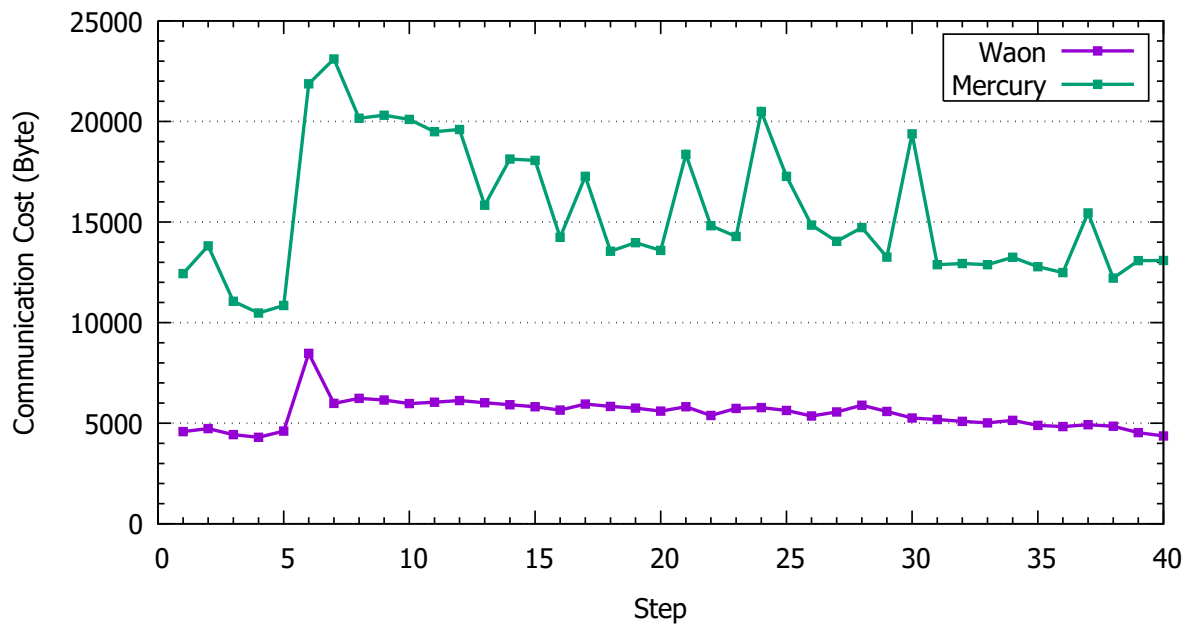


図 2.11 メッセージ量の推移

するが、ネットワークの再構築を繰り返すためにノード間で交わされるメッセージ量が増加することを確認した。

Local Objects			
Name	Age	Place	Detail
oide	20	sendai	SampleSafetyInformation ▲
tanaka	55	shiogama	SampleSafetyInformation
horikawa	20	yamadera	SampleSafetyInformation
tanaka	20	rifu	SampleSafetyInformation
takada	20	rifu	SampleSafetyInformation
sato	15	rifu	SampleSafetyInformation

図 2.12 管理コンテンツ

2.5.2 P2P 型安否情報共有システムの機能評価

2.4 節で設計した P2P 型安否情報共有システムを実装し，複数属性による検索や範囲検索といった高度な検索が正しく行われるかの検証を行った．ノードや安否情報に与える ID 長は 40 バイト ($0 \leq id < 2^{320}$)，近距離用リンクの最大エントリー数は $r = 2$ とした．また，ノードに与える初期 ID は，ノードの物理的な近傍性を考慮した ID 生成の代替として IP アドレスから生成したハッシュ値に基づいて決定した．そのため，本実装では，ネットワークの物理的なトラフィックの軽減と，安否情報の複製を被災地外のノードへ転送する機能は未実現である．

本システムの範囲検索が正しく機能するかを確認するために，8 台のノードで構成されるネットワーク上に表 2.1 に示す安否情報を登録し，実験を行った．図 2.12 に安否情報配置後における，あるノードの管理している安否情報のリストを示す．本実験で共有する安否情報は 16 名分であるが，複製を含めて実際には延べ 48 名分の安否情報がアップロードされている．Waon の動的負荷分散の実行によりそれらは 8 台のノードによって平等に割り当てられ，図 2.12 に示すように 1 台あたりの管理安否情報数は 6 名分になる．なお，本実験環境は想定する規模と比較してかなり小さいものとなっているが，個々の安否情報は非常に小さいデータ量であるため，ネットワーク規模が機能に与える影響は少ないと判断した．

図 2.13(a) に，避難場所が“sendai”の安否情報の範囲検索の結果，図 2.13(b) はその条件に 20 代の避難者という条件を加えた複数条件による検索結果をそれぞれ示す．図 2.13(a) より，条件に合う全ての安否情報をネットワーク上から検索できた．また，

表 2.1 実験で用いた安否情報

Name	Age	Place	Detail
oide	20	sendai	SampleSafetyInformation
horikawa	20	yamadera	SampleSafetyInformation
horikawa	50	yamadera	SampleSafetyInformation
tanaka	55	shiogama	SampleSafetyInformation
sato	15	rifu	SampleSafetyInformation
tanaka	20	rifu	SampleSafetyInformation
takahashi	30	sendai	SampleSafetyInformation
saito	25	tomiya	SampleSafetyInformation
takahashi	20	tomiya	SampleSafetyInformation
saito	25	rifu	SampleSafetyInformation
takada	20	rifu	SampleSafetyInformation
takahashi	25	sendai	SampleSafetyInformation
sato	60	tomiya	SampleSafetyInformation
takahashi	40	yamadera	SampleSafetyInformation
sato	50	sendai	SampleSafetyInformation
takahashi	40	sendai	SampleSafetyInformation

図 2.13(b) より，図 2.13(a) の検索結果から更に 20 代の安否情報を抽出して表示できた．

2.5.3 P2P 型安否情報共有システムの性能評価

2.5.2 節で行った実験規模を拡大し，不安定なネットワーク環境下における安否情報の検索性能に関する実験を行った．そこで，本実験では各ノードにネットワークからの離脱率と再参加率を設定し，それらの確率に基いてネットワークへの参加と離脱を繰り返させることで不安定なネットワーク環境を想定する．ただし，ノードが離脱している間も管理コンテンツを削除せず保持し続けるものとした．

Search Result			
Name	Age	Place	Detail
oide	20	sendai	SampleSafetyInformation ▲
sato	50	sendai	SampleSafetyInformation
takahashi	25	sendai	SampleSafetyInformation
takahashi	30	sendai	SampleSafetyInformation
takahashi	40	sendai	SampleSafetyInformation

(a) result (“search * * sendai”)

Search Result			
Name	Age	Place	Detail
oide	20	sendai	SampleSafetyInformation ▲
takahashi	25	sendai	SampleSafetyInformation

(b) result (“search * 2* sendai”)

図 2.13 検索結果

図 2.14 設定パラメータ例

Area	(Join, Leave)
outer disaster area	(0.9, 0.01)
near disaster area	(0.3, 0.05)
inner disaster area	(0.05, 0.4)

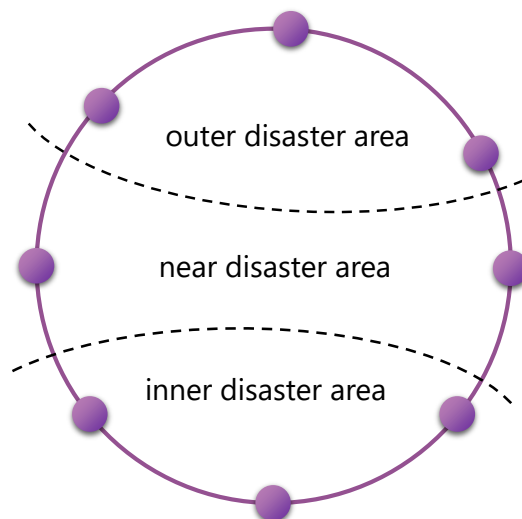


図 2.15 ネットワーク環境区分

表 2.14 に実験で用いたネットワーク環境区分とノードに設定する離脱率・再参加率の例を示す．ネットワーク環境区分は，非被災地（outer disaster area），周辺被災地（near disaster area），中心被災地（inner disaster area）であり，これらの区分を図 2.15 で示すように Waon ネットワーク上のノードの初期位置に基づいて割り当てた．

ノードは 32 台起動し，320 人分の安否情報（複製を含めて 960 コンテンツ）のコンテンツを共有させる．各ノードは動的負荷分散の実行 1 回を 1 step とし，以下の動作をす

表 2.2 各ネットワーク環境区分と設定パラメータ

Environment	Outer Area	Near Area	Inner Area
Environment1	(0.9, 0.01)	(0.7, 0.02)	(0.2, 0.1)
Environment2	(0.4, 0.01)	(0.3, 0.05)	(0.1, 0.2)
Environment3	(0.3, 0.02)	(0.2, 0.1)	(0.05, 0.4)

ることとした。

steps 1-5 ノード間で経路表を交換し Waon ネットワークを構築する

step 6 320 人分の安否情報を 1 台のノードから登録する

steps 7-100 負荷分散と安否情報の複製を繰り返す

評価指標として、安否情報の生存率 (Object Alive Ratio) と安否情報の参照可能率 (Information Alive Ratio) を定義する。安否情報の生存率は、複製を含めた 960 コンテンツのうちアクセス可能なコンテンツ数の割合を示す。また、安否情報の参照可能率は、複製のうち 1 つでもアクセス可能であればその安否情報が生存しているとみなした場合の安否情報の生存率である。

ネットワーク環境毎の検索性能評価

本実験では、表 2.2 に示す 3 つのネットワーク環境を想定し、それぞれの環境における安否情報の検索成功率について検証した。このうち、Environment 1 は最も安定した環境であり、Environment 3 が最も不安定な環境となっている。特に、Environment 3 においては図 2.16 に示すように常に全体の 6 割程度のノードしか参加しない不安定なネットワークである。なお、安否情報の複製頻度は 2 step に 1 度とした。

図 2.17 に本実験の結果を示す。図より、安否情報の生存率はネットワークの環境の不安定さに応じて変化するが、常に、ほぼ全ての安否情報への参照が可能であることが分かった。ただし、最も不安定な Environment 3 においては一時的に最大 8% の安否情報への参照が不可能となった。

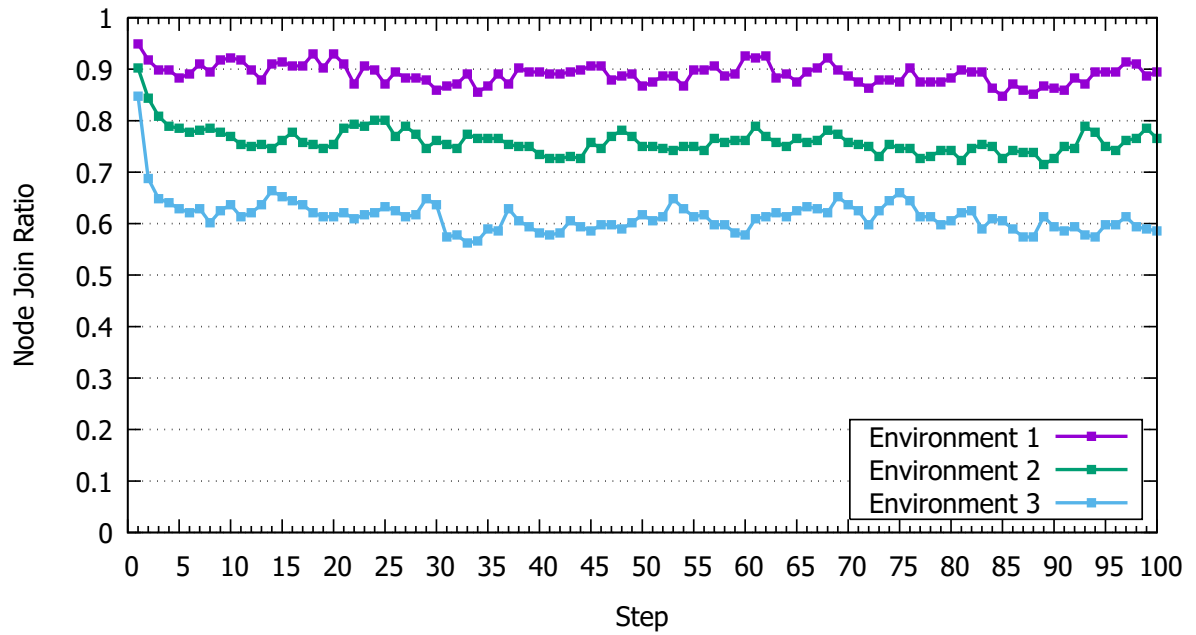


図 2.16 参加ノード率の推移

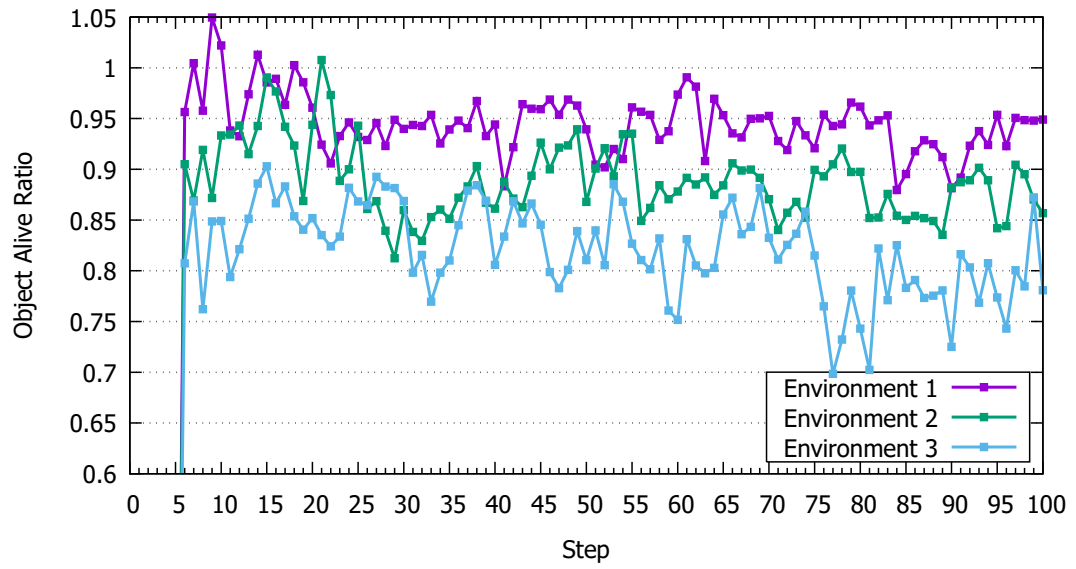
複製頻度毎の検索性能評価

本実験では、2.5.3 節において安否情報の参照可能率が下落した Environment 3 について、安否情報の複製頻度を変化させることによる影響を検証した。複製頻度は、それぞれ 1 step, 2 step, 3 step に 1 度とした (*replication_frequency* = 3, 5, 10)。

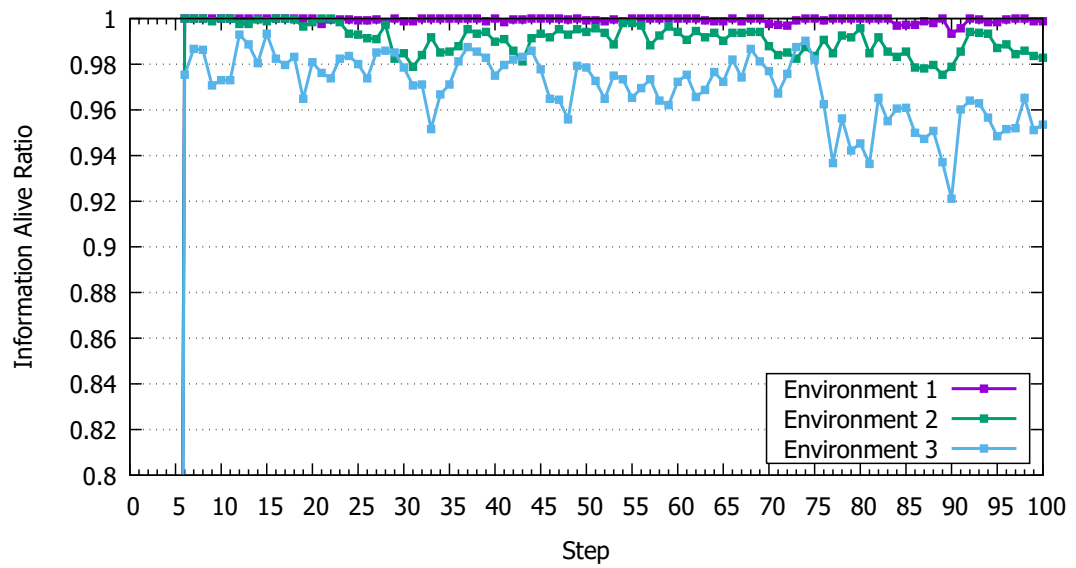
図 2.18 に本実験の結果を示す。結果より、複製周期を短縮することで参照可能率の改善が確認されたが、常に 100% を維持することは困難であることが確認された。

負荷分散性能評価

図 2.19 に図 2.17 および図 2.18 に示した実験時の Waon による負荷分散性能を示す。評価指標には 2.5.1 節で用いた Fairness Index を用いた。結果より、環境・複製頻度に依らずに負荷分散が行われたが、全ての場合において 0.8 を下回る結果となった。

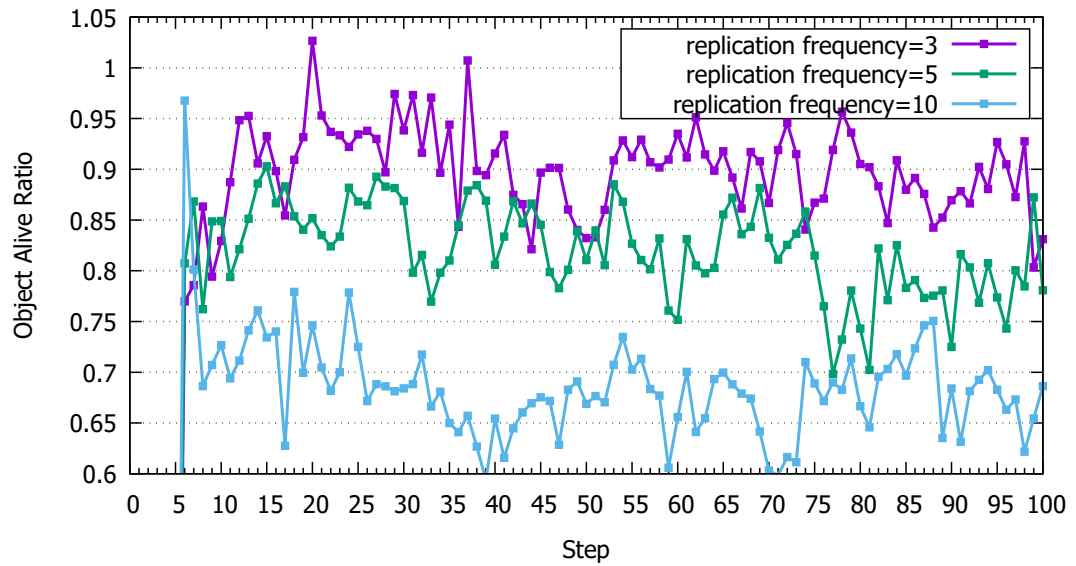


(a) 安否情報の生存率

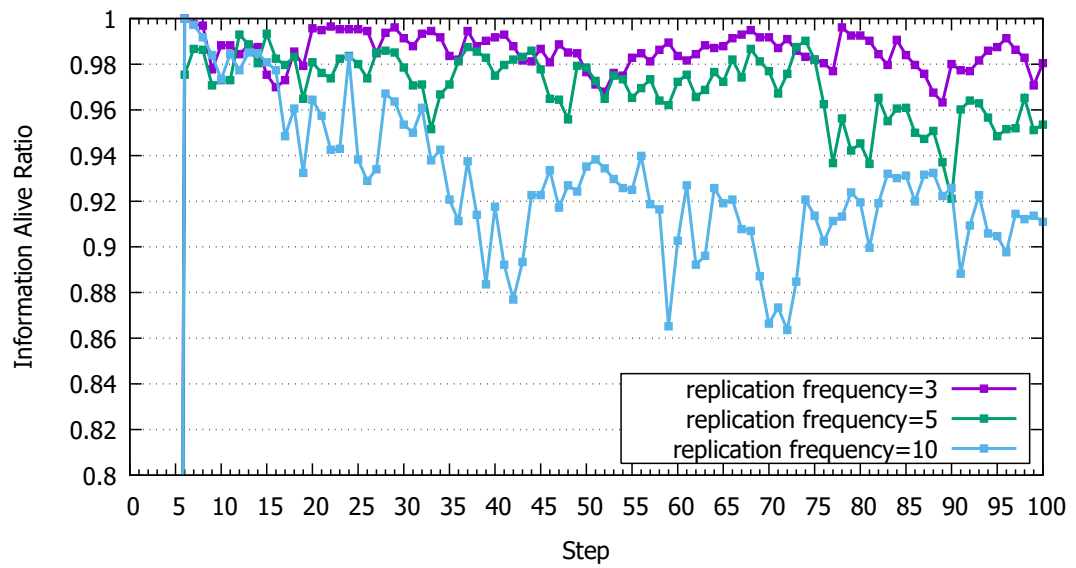


(b) 安否情報の参照可能率

図 2.17 環境毎の検索性能の推移

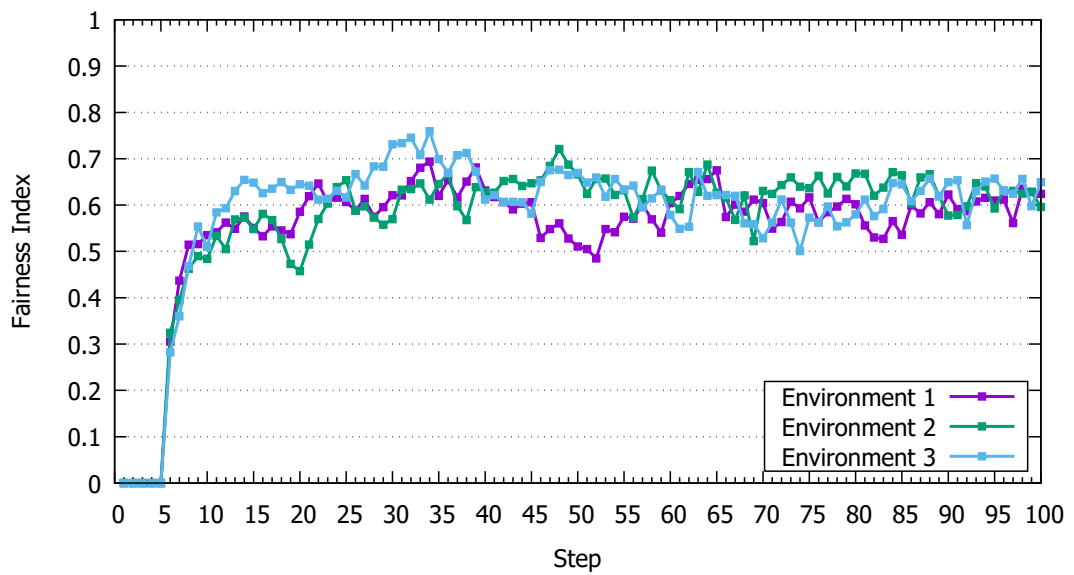


(a) 安否情報の生存率

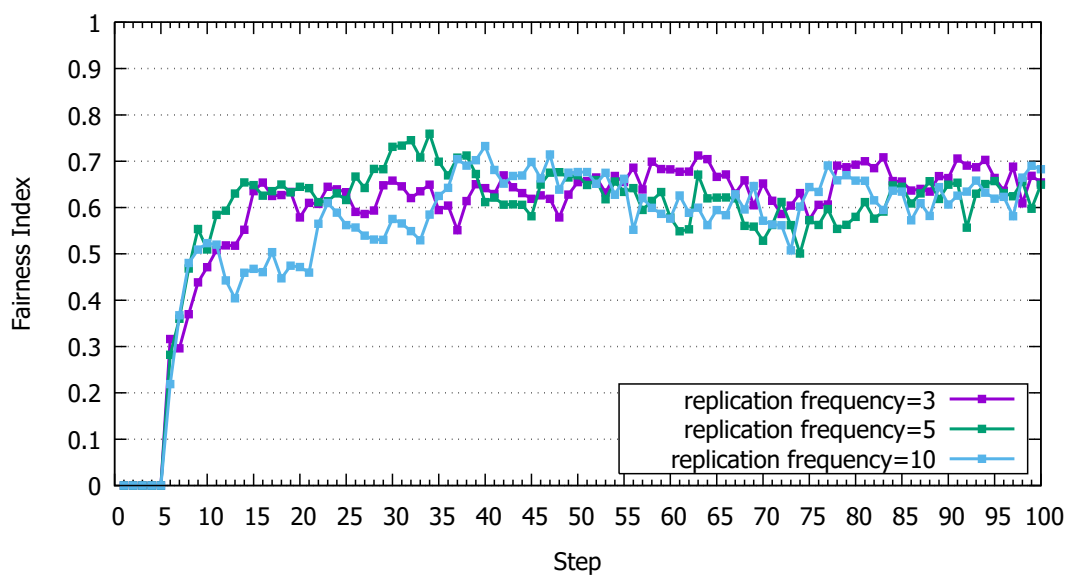


(b) 安否情報の参照可能率

図 2.18 複製頻度毎の検索性能の推移



(a) 環境毎の Fairness Index



(b) 複製頻度毎の Fairness Index

図 2.19 負荷分散性能の推移

2.5.4 考察

Waon について、2.5.1 節の実験結果から、2.3 節で述べた通信コストの増加を防ぐ動的負荷分散が実行され、動的に負荷分散を実行したことを確認した。これにより不安定なネットワーク環境下において少ない通信量で機能を実現するシステムを実装できた。また、Mercury との比較によって、Waon がよりネットワーク資源が不足する大規模災害時における利用に適していることを確認した。以上から、(R3) が充足されたといえる。

なお、Waon の値の収束が遅い理由として、Mercury における負荷分散との方針の違いが考えられる。Mercury における負荷分散アルゴリズムは、論理ネットワーク全体の平均負荷値を推定した後に、最も負荷がかかっていないと推測されるノードが一時的にネットワーク上から離脱し、最も負荷がかかっていると推測されるノード付近に再加入することで負荷の分散を実現する。そのため、Mercury ではより高速に収束状態に向かう一方で、論理ネットワークの再構築が頻繁に行われる。一方、Waon における負荷分散アルゴリズムでは、自身の周辺のノード全てが過負荷であることが分かっていたとしても、自身の predecessor に対してのみ負荷分散を実行する。そのため、収束状態に至るまでにより多くの時間がかかるが、その間ノードは論理ネットワークの再構築が不要となる。今回想定している環境ではノード間での通信は最小限に抑えることが求められるため、Waon による負荷分散の方がより適している。しかし、収束の速度が遅い問題の他にも、収束の速度がコンテンツの偏り具合に影響されるという問題が既知の課題として挙げられている。そのため、パラメータの最適化やアルゴリズムの効率化によって、収束速度を Mercury 等の既存研究と遜色のない速度にすることが今後の課題として挙げられる。

P2P 型安否情報共有システムについて、2.5.2 節の実験結果から、2.4 節で述べた各機能が正しく動作し、目的の安否情報を的確に検索できたことを確認した。これにより要件 (R1) と (R2) が充足され、ファイル共有システムで必要不可欠である範囲検索などの柔軟な検索機能を実現し、実用に向けた安否情報共有システムとしての機能を実装できた。また、2.5.3 節の実験結果から、動的負荷分散および定期的な安否情報の複製により不安定なネットワーク環境上のノード間で適切に安否情報を共有し、常に図 2.16 で示

したノードの生存割合より多くの安否情報を参照できることを確認した。ただし、ネットワーク環境が悪化した場合は、複製周期を短くすることで安否情報への到達可能性が維持できるが、現状の実装ではより不安定なネットワーク環境において全ての安否情報への参照ができないことが示唆されている。安否情報が失われた原因は、ネットワーク環境の不安定なノードへ複製を配置することにある。現状のアルゴリズムでは複製の管理ノードを静的に決定しているため、より安否情報への到達可能性を向上させるためにはノードの安定性を考慮した複製のコンテンツ ID の生成アルゴリズムを導入する必要がある。また、ネットワーク環境の不安定さに応じてノードが自律的に複製頻度を変更する戦略も有効であると考えられる。

2.6 まとめ

本章では、「課題 A：センサデータ流通基盤のネットワーク構築に関する課題」に対して「提案 A：自律分散型 P2P 通信基盤 Waon」を提案した。Waon では、論理ネットワークの維持に必要な情報のみを用いて各ノードにかかる負荷を推定し、論理ネットワークの再構築を必要とせずに動的な負荷分散を実現する。論理ネットワークの構築には制約がないため、ノードの物理的な近傍性を考慮したネットワークの構築や、コンテンツの種類や属性値に応じた配置が可能であり、柔軟な機能多様性を持つ IoT システムを Waon 上で展開することができる。不安定なネットワーク環境のユースケースとして、大規模災害時を想定した P2P 型安否情報共有システムに Waon を適用したシミュレーション実験では、Waon が通信コストの増加を抑制した上で動的な負荷分散を実行できることを示した。また、P2P 型安否情報共有システムでは、不安定なネットワーク環境下においても残存機器のみで安否情報を共有し、安否情報への高い到達可能性を維持できることを示した。以上から、「課題 A：センサデータ流通基盤のネットワーク構築に関する課題」を解決し、不安定なネットワーク環境下においても動作可能なセンサデバイス間通信基盤を実現した。

今後の課題として、Waon については負荷分散が安定するまでの時間を短縮するため

のアルゴリズムを検討する必要がある。これは、アルゴリズムの性質上、論理ネットワークの再構築を行わずに負荷分散を実行するため、関連研究よりも安定状態まで遷移するまでに時間を要する為である。ただし、安定状態へ遷移するまでに許容される時間や負荷値の定義は、ネットワーク環境等の前提条件や IoT システムの機能要件と関連するため、それらのコンテキストによって柔軟に対応する必要がある。また、P2P 型安否共有システムについては負荷値の定義をノードの性能やネットワーク環境を考慮するように拡張する必要がある。これにより、特に被害の大きい地域のノードは情報の登録と閲覧のみを行い、比較的被害の少ない地域のノードが安否情報の管理を引き受けるなど、ノード間でネットワーク上における自律的な役割分担を可能とする。また、大規模災害時以外のユースケースを想定した応用例についても検討し、Waon の適用可能性や適用範囲についてより広範にわたって示す必要がある。

第 3 章 契約概念に基づくセンサ データ流通基盤

3.1 はじめに

第 1 章で述べたように，将来の超スマート社会の実現のために，ネットワークを介して接続された多種多様な周囲のセンサデバイスおよび他の IoT システム間で高度に連携協調し，センサデータを横断的に活用して新しい価値やサービスを創出していくことが求められている．また，学術領域におけるセンサデータの利活用を目的としたネットワーク構築においては，あらかじめ存在が既知である専用のセンサデバイスのみの利活用モデル (WMS, WSN, ON) から，自動車や人物の持つ携帯端末といった存在が未知である汎用のセンサデバイスを含めた利活用モデル (VANET, PCN) へ関心がシフトしつつある．今後爆発的に普及が見込まれる IoT デバイスの全てを事前に把握しシステムへ把握することは現実的ではないため，特に人々の移動に伴う未知の携帯端末の出現・移動・消滅を許容する PCN が IoT 社会の実現に向けて親和性が高く，更なる研究開発の推進が求められている．

そのうち，第 2 章では，(課題 A) センサデータ流通基盤のネットワーク構築に関する課題の解決に取り組み，「提案 A：自律分散型 P2P 通信基盤 Waon」を提案した．これにより，不安定なネットワーク環境下においても動作可能なセンサデバイス間通信基盤を実現した．

そこで，本章では，「課題 B：センサデータ流通基盤の流通経路構築に関する課題」の解決に取り組む．今日，小型化・高機能化したセンサデバイスを活用するセンサ型アプ

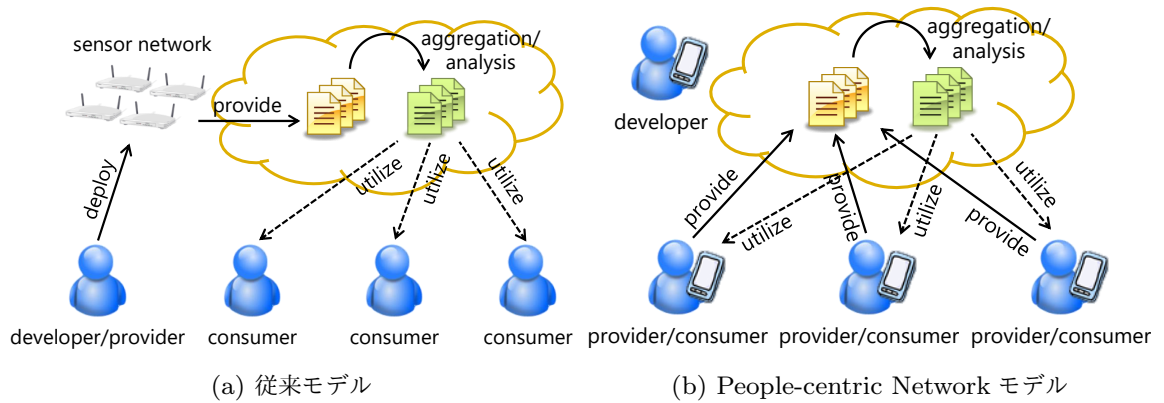


図 3.1 センサ型アプリケーションのサービス構成モデル

リケーションは、気温・湿度・照度・雨量などの環境情報をモニタリングして農作業の効率化を図る ICT 農業支援システム [4, 47] や、家庭内ネットワークにおいて各家電の消費電力をモニタリングして管理する HEMS [48]、心拍や血圧などの生体情報から異常状態を検出するヘルスケアシステム [49] など、様々な応用例が産業・学術問わず研究開発されている。このような従来のセンサ型アプリケーション [47, 48, 50, 51] のサービス構成モデルは、サービス開発者がサービス毎に専用のセンサデバイスを設置して独占的にセンサデータを獲得するため（図 3.1(a)）、汎用的なセンサデバイスの利活用には限界がある。また、センサデータはあらかじめ決められたセンサデバイスから固定的な頻度・空間解像度・精度で獲得されて利用者に提供されるため、センサデータの流通経路は固定的に決定される。これに対し、PCN [10, 12, 13] あるいは Mobile-phone sensing (Crowd sensing) [52] では、人々が日常的に携帯するスマートフォン等の汎用センサデバイスからセンサデータを獲得するため（図 3.1(b)）、専用センサデバイスに加え汎用センサデバイスの利活用が可能である。そのため、本研究では PCN に着目する。

PCN に基づくセンサ型アプリケーション [16–18, 20, 53] のサービス構成モデルでは、獲得されたセンサデータはサーバ・クラウド上に蓄積され、データ利用者からの要求に応じて加工・提供されることが一般的である。このとき、参加者の汎用のセンサデバイスからセンサデータを獲得する PCN モデルでは、専用のセンサデバイスからセンサデータを獲得する従来モデルとは異なり、個々のセンサデータの所有者の存在を新たに考慮する必要がある。しかし、PCN モデルでは、データ提供者とデータ利用者間に直接的な関係は

なく、自身が提供データがどのように利用されるかが分からない状態で提供を行っており、また、それらを知ることはサービス構成モデルの構造上困難である。そのため、データ所有者のプライバシーポリシーを、センサデータの利用用途等に基づいて適切に反映し、データ個々の粒度でその流通経路を制御する必要がある。特に、本研究で想定する IoT 環境においては、所有者が普段携帯するスマートフォン等の個人所有のセンサデバイスを構成要素に含んでおり、それらから獲得されるデータにはパーソナルデータ [22,23] を含むことがある、パーソナルデータとは、移動履歴や購買履歴・交通機関の利用履歴など、複数のデータを組み合わせることで間接的に個人の特定が可能となるデータを指し、これらは適切な匿名化等を施してもデータの送出そのものに社会的な不安が存在することが知られている [24,25]。そのため、センサデータの開示設定だけではなく、例えばセンサデータの流通範囲をある地理範囲に限定したり、データ利用者との関係性に基づいて提供頻度を変化させるといった、柔軟な流通経路の構築手法の実現が必要である。

そこで、本章ではデータ提供者のポリシーを柔軟に反映可能なセンサデータ流通基盤として「提案 B：契約概念に基づくセンサデータ流通基盤 COSAP」を提案する。COSAP (Contract-Oriented Sensor-based Application Platform) では、参加者は第 2 章で提案した自律分散型 P2P 通信基盤 Waon によって相互に接続され、自身の提供ポリシーおよび他参加者からのセンサデータ要求に応じて生成される“契約”に基づいて一時的な関係を結び、流通経路を当事者間で構築してセンサデータの流通を行う。このとき、参加者の提供ポリシーおよびデータ要求は契約指向サービス構成モデルとしてモデル化されて COSAP 上に登録され、エージェントによる情報流通プロトコル (Contract-oriented Information Flow Protocol: CIFP) を用いた自動交渉によって動的にデータの流通経路が決定される。そのため、COSAP によって、特別な知識や操作を必要とせずに参加者のポリシーを反映しながら参加者全体を対象とした高効率なセンサデータの流通を行うことが可能となる。

本章の構成は以下の通りである。3.1 節では、本章の概要について概説した。3.2 節では、従来のセンサ型アプリケーションとセンサデータの流通基盤に関する研究を挙げ、それらの特徴と課題について述べる。次に、それらの課題を解決するために、3.3 節で契約

概念に基づくセンサデータ流通基盤 COSAP について述べ、3.4 節で COSAP で用いるサービス構成モデルおよび情報流通プロトコルの設計について詳述する。その後、3.5 節でシミュレーション実験によって COSAP および提案プロトコルの有用性について評価する。最後に、3.6 節で本章のまとめと今後の課題について述べる。

3.2 関連研究と課題

3.2.1 センサ型アプリケーション

センサデバイスから獲得される膨大なセンサデータを活用する、センサ型アプリケーションに関する研究が様々な分野で行われている [47–51]。ホームネットワークを対象にした研究 [50] では、家庭内に設置されたセンサから得られた情報をサーバで集約して解析し、その結果をもとに自律的な家電の制御を行っている。気象データを対象とした研究 [51] では、地域ごとに観測データを集約して共有するアプリケーションが提案されている。これらのサービス構成モデルでは、独占的なセンサデータの提供により、サービス開発者がサービス毎にセンサデバイスを設置する必要があるため、センサ資源やネットワーク資源の効率的な利活用に課題がある。また、センサデータはあらかじめ決められたセンサデバイスから固定的な頻度・空間解像度・精度で獲得されて利用者に提供されるため、利用者の要求に応じてサービス構成を変える、利用者指向サービスの実現には限界がある。一方、官公庁や自治体が保有するデータをオープンデータとして公開する取り組みも近年進められている [54–56]。これらの取り組みでは、提供者が固定的な頻度・精度で獲得したセンサデータを提供するため、それらのデータを利用して構築されるサービスには空間的・時間的な制約が存在する。

これらの課題の解決のために、近年では、参加型センシング [14] に基いたセンサ型アプリケーションの研究開発が行われている。文献 [57] では、利用者のスマートフォンから位置情報と加速度情報を獲得して行動推定を行い、CO₂ 濃度などの大気情報を共有する既存の参加型センシングネットワーク [58] と連携させたライフログシステムを提案している。この他にも、環境情報を収集して作成する大気汚染マップの提供 [17] や、音情

報を収集して作成するノイズマップの提供 [16, 53] など、スマートフォン等の高機能化した小型センサデバイスから得られるセンサデータの利活用が進められている。

しかし、これらのシステムでは、利用者からデータを獲得する際に提供者のポリシーを考慮せずに固定的に収集を行っている。また、様々な利用者要求に応じるため、それらの獲得は高頻度かつ高精度で行われる。そのため、不必要なセンサデータを提供する恐れがあるほか、利用者の持つスマートフォンの消費電力が増大するなどの課題がある。また、これらのシステムでは提供者が提供したデータの利用用途を提供者自身が知ることとは困難である。そのため、位置情報や騒音情報だけではなく、連続した移動履歴や購買履歴、公共交通機関の利用履歴といった、よりプライバシーレベルの高いパーソナルデータを利用するアプリケーションの実現には限界がある。

3.2.2 データ共有プラットフォーム

前節で述べた課題を解決するために、利用者からの要求に応じてオンデマンドにセンサ型アプリケーションを構築し、必要十分なデータのみを流通するデータ共有プラットフォームに関する研究も行われている [18, 20, 21]。参加型センシングのモデルに基づくプラットフォーム [18, 20] では、ユーザが収集したいデータの情報を、タスクとして自ら自由にプラットフォーム上に登録する。その後、このタスク情報を閲覧した他のユーザがプラットフォームを介してセンサデータの授受を行う。しかし、これらのプラットフォームではデータの提供時に他者のタスク情報を閲覧する必要があるため、固定的にデータを提供する従来のセンサ型アプリケーションの利用と比較して手間が増大している。参加型センシングにおいて利用者のモチベーションを高めデータの提供を促すことは重要である。しかし、自身が提供できるタスクの発見が手動であることや、環境や自身の提供ポリシーの変化に伴うデータ流通設定の変更が手動であることは、モチベーション付与への大きな障害となることが考えられる。

3.2.3 関連研究における課題

従来のセンサデータの利用モデルには、固定的・独占的にデータを獲得するアプリケーション [50,51] やデータストア [54-56] があるが、これらはサービス提供者が主導してセンサデータの収集や提供を行っている。そのため、センサデバイスの所有者のポリシーが十分に反映されないデータ流通が行われる恐れがあり、不要なりソースの消費や不本意なパーソナルデータの開示を引き起こすことが考えられる。一方、他の利用者からの要求に応じてオンデマンドにデータを共有するデータ共有プラットフォーム [18,20,21] では、データの提供者である利用者側が主導してセンサデータの共有を行うため、所有者のポリシーを反映したセンサデータの流通が可能である。しかし、ポリシーに合致するタスクの発見や、ポリシーや環境の変化への追従が煩雑であり、利用者からのデータ提供そのものが行われない恐れがある。以上から、従来のセンサ型アプリケーションの構成モデルでは、提供者のポリシーを考慮した動的なセンサデータの利活用に限界があるといえる。

本研究では、利用者からの要求や提供者のポリシーをモデル化してプラットフォーム上に登録し、それらを知識として持つ利用者コンポーネント間の情報流通プロトコルを用いた自動交渉によってデータの流通を実現する。そこで、提案する情報流通プロトコルで対象とする既存研究における課題を以下のように整理する。

(R1) 提供者のポリシーに応じたセンサデータの流通設定が困難：利用者の持つ端末から生成されるデータにはパーソナルデータ等のプライバシーセンシティブなデータを含むことや、データの獲得そのものに電力消費等のコストがかかることから、提供者の提供ポリシーやプライバシー等を考慮したデータの流通が必要である。しかし既存研究におけるデータ共有のアプローチでは、データの品質をデータ利用者側が決定したり、ポリシーを満たす要求の発見をデータ提供者自身が行う必要があった。これらは、提供者への負担を強いるものとなっている。このため、提供者へ負担をかけることなく公開範囲や利用用途を限定してセンサデータを提供する、提供者のポリシーに基いたセンサデータの流通設定が困難である。

(R2) 提供者のポリシーの変化に応じたサービスの動的制御が困難：提供者のポリシー

に基いたセンサデータの流通によって実現されるサービスでは、提供者のポリシーの変化に応じて柔軟にセンサデータの流通を制御する必要がある。しかし、データの流通を変更することによって提供するサービス品質も変化するため、利用者要求との兼ね合いを考慮して制御する必要がある。しかし既存研究におけるサービス構築のアプローチでは、固定的・独占的に獲得したセンサデータを利用するため、サービスの制御にデータの提供者を考慮していないか、またはポリシーの反映を提供者自身が手動で行う必要がある。このため、既存技術では提供者のポリシーの変化に応じたサービスの動的制御が困難である。

3.3 COSAP

3.3.1 概要

本章で提案する契約指向センサ型アプリケーションプラットフォーム (Contract-Oriented Sensor-based Application Platform: COSAP) の概要を図 3.2 に示す。COSAP はサーバレスなアーキテクチャを採用しており、任意のセンサネットワークによって繋がれた利用者所有の端末上で動作する。利用者はトランスポート層の機能を利用して端末間での直接的な通信が可能であり、オーバーレイ層は自律的に構築された構造化 P2P ネットワーク Waon による検索機能によって目的の端末への到達可能性を提供する。コンポーネント層における共通基盤上では、契約指向サービス構成モデルに基づいて利用者間で契約関係を結ぶことでデータの流通を実現し、センサ型アプリケーションを動的に構築する。利用者は、センサデータの提供者として、自身が所有するセンサデバイスの登録や、それらから生成されるセンサデータの提供ポリシーの変更を行う。また、アプリケーションの利用者として、登録されたセンサデバイスからセンサデータを収集するアプリケーションを動的に構築する。

COSAP 上におけるアプリケーションの構成要素（コンポーネント）には **User**, **MGR**, **Sensor**, **App** の 4 種類がある。

のを善意で登録する

- 登録されたセンサには，提供者のプライバシーポリシーや許容する電力消費の観点から，公開範囲や公開対象の制限，転送の許可，提供頻度を提供ポリシーとして設定する
- 利用者はアプリケーションの利用者として，任意の空間，頻度でセンサデータをリアルタイムで収集するセンサ型アプリケーションを動的に構築する
- アプリケーション内ではセンサデータは生データのままで流通し，加工データの流通は行わない

また，上記の環境上で構成される具体的なセンサ型アプリケーション例として，以下の様なアプリケーションを想定している．

天候モニタリングシステム：目的地周辺の気温・照度・湿度・雨量センサ等の環境センサを動的に発見してセンサデータを収集し，リアルタイムで表示する．従来の天候モニタリングシステムと比較して，利用者の要求に則った地点の詳細な天候データが得られるという効果が期待できる．

健康管理システム：被観察者の健康状態に応じて心拍・血圧センサ等の生体センサから収集するセンサデータの頻度や項目を変更し，リアルタイムで表示する．従来の健康管理システムと比較して，不必要なセンサデータの流通を制御できるため生体センサの消費電力を抑えられるという効果が期待できる．

3.4 設計

3.4.1 契約指向サービス構成モデル

本基盤では，センサデバイス・センサネットワーク・アプリケーション等のコンポーネントが，柔軟かつ高度に協調するモデルが必要となる．そこで，コンポーネント間の相互作用を“契約”概念に基づく関係として捉えて組織化し，センサデータの流通を制御することでアプリケーションを実現する契約指向サービス構成モデルを定義する．本モデ

表 3.1 ポリシーの属性の定義

Policy	: ポリシー
Scope	: 許可するデータの流通形態. 許可する程度により, PUBLIC, PROTECTED, PRIVATE の 3 段階から選択する
Frequency	: データの流通を行う頻度. 高頻度 (HIGH), 中頻度 (MIDDLE), 低頻度 (LOW) の 3 段階から選択する
Area	: データの流通を許可する地理的な範囲. 中心座標 (Center) と中心からの距離 (Range) の円形で表現する

ルにおけるアプリケーションは, データの提供者である **Sender**, データの利用者である **Receiver**, そしてそれらを監視する **Manager** の 3 つの構成要素から成る. 1 つのアプリケーションにつき **Receiver** は 1 つだが, **Sender** や **Manager** は複数存在してもよいものとする. データの流通は **Sender** から **Receiver** に向けて行われ, その際の頻度や利用用途は構成要素間で事前に締結された契約に基づいて決定される.

以降, 3.3.2 節で述べた利用者環境において, 提供者・利用者双方の要求を表現するための各構成要素のモデル化を行う.

ポリシー

本サービス構成モデルにおけるポリシー (**Policy**) の持つ属性を表 3.1 に定義する. このうち, **Scope** の各要素の意味合いは, 提供者・利用者・契約のどの構成要素が持つポリシーなのかで変化する. また, **Frequency** の各要素の具体的な頻度は実装によって決定される. なお, **Scope**, **Frequency** の各要素には以下の大小関係を持つものとする.

Scope.PUBLIC \supset **Scope.PROTECTED** \supset **Scope.PRIVATE**

Frequency.HIGH \supset **Frequency.MIDDLE** \supset **Frequency.LOW**

表 3.2 提供者／利用者の属性の定義

Sender/Receiver : 提供者／利用者	
ID	: それぞれに与えられる一意の数値
DataType	: (提供者) 提供できるセンサデータの種類 (利用者) 獲得したいセンサデータの種類
Location	: 存在位置
Policy	: (提供者) 提供ポリシー (利用者) 利用者要求
WhiteList	: (提供者のみ) 提供を許可する利用者のリスト

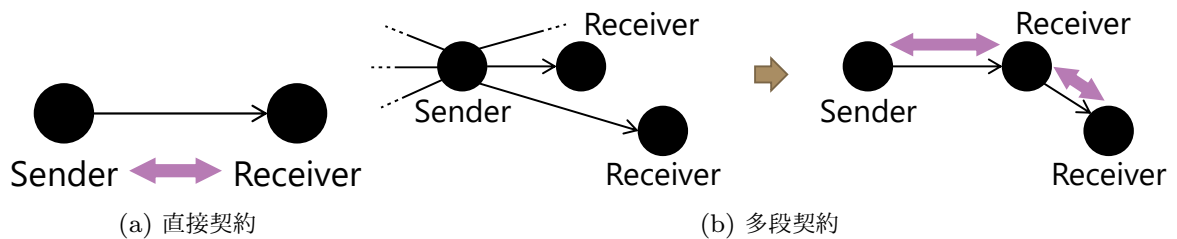


図 3.3 契約形態

提供者／利用者

本サービス構成モデルにおけるデータの提供者 (Sender) と利用者 (Receiver) の持つ属性を表 3.2 に定義し、両者のもつ Policy における、それぞれの要素の意味合いを表 3.3 に定義する。

契約

本サービス構成モデルにおける契約 (Contract) の形態を以下に定義し、その概念図を図 3.3 する。

直接契約 : 提供者 (Sender) と利用者 (Receiver) が直接的に交渉して結ばれる契約。

多段契約 : 直接契約を結んでいる Receiver が、その契約で獲得するデータの中継者として他の Receiver と交渉して結ばれる契約。センサデータの発生源である Sender を、その多段契約の SouceSender とし、SouceSender に近い契約を上位

表 3.3 提供者／利用者のポリシーの定義

Sender.Policy : 提供ポリシー	
Scope.PUBLIC	: 自由に転送を許可
Scope.PROTECTED	: 認証後に転送を許可
Scope.PRIVATE	: 転送を禁止
Frequency	: データを送信できる頻度
Area	: データを提供する利用者の存在範囲

(a) 提供者のポリシー

Receiver.Policy : 利用者要求	
Scope.PUBLIC	: 自由に転送を実行
Scope.PROTECTED	: ポリシーを継承して転送を実行
Scope.PRIVATE	: 転送を実行しない
Frequency	: データを受信したい頻度
Area	: 利用したいデータの生成範囲

(b) 利用者のポリシー

の契約であるとする。また、ある `Contract` を基準にした際の、1 つ上位の契約を `RelayContract` として表記する。

契約の持つ属性を表 3.4, 契約の流通条件におけるそれぞれの要素を表 3.5 に定義する。なお、直接契約の際には `Contract.SourceSender = Contract.Sender` が成り立つものとする。また、以下の条件を満たす 2 契約 (`contractA`, `contractB`) を重複契約と定義する。重複契約の存在は、同一のセンサデータが複数の経路で流通していることを意味する。

```
contractA.Receiver = contractB.Receiver
contractA.SourceSender = contractB.SourceSender
```

表 3.4 契約の属性の定義

Contract	: 契約
ID	: 契約毎に与えられる一意の数値
DataType	: 流通データの種類
Receiver	: データの利用者
Sender	: データの提供者
SourceSender	: データの 1 次提供者
Condition	: 流通条件

表 3.5 契約のポリシーの定義

Contract.Condition	: 流通条件
Scope.PUBLIC	: 自由に多段契約を許可
Scope.PROTECTED	: SourceSender の認証後に多段契約を許可
Scope.PRIVATE	: 多段契約を禁止
Frequency	: データを流通する頻度
Area	: データを流通する利用者の存在範囲

表 3.6 センサデータの属性の定義

Value	: センサデータ
DataType	: センサデータの種類
Location	: 生成場所
Timestamp	: 生成時刻
SourceSender	: 生成者
data	: センサ値

センサデータ

本サービス構成モデルにおけるセンサデータ (Value) の持つ属性を表 3.6 に定義する。

表 3.7 メッセージの属性の定義

Message : メッセージ	
Tag	: メッセージの種類
Src	: 送信者
Location	: 送信位置
Payload	: ペイロード

メッセージ

本サービス構成モデルにおいて構成要素間でやりとりされるメッセージ (**Message**) の持つ属性を表 3.7 に定義する。

3.4.2 情報流通プロトコル

構成要素間での契約管理のための情報流通プロトコル (Contract-oriented Information Flow Protocol: CIFP) として、以下のプロトコルを提案する。

契約締結プロトコル : センサデータの提供ポリシーや利用者との関係に基いてデータの流通を制御する、構成要素間の契約締結のための基本プロトコル。契約交渉時には、Sender, Receiver 双方のポリシーの他、両者の関係性に基いて成立の是非が決定される。このプロトコルの適用により、提供ポリシーに応じた柔軟なセンサデータの流通を実現し、課題 (R1) を解決する。

契約内容変更プロトコル : 提供ポリシーや利用者の要求、ネットワーク環境の変化などに応じて契約内容の変更を行うためのプロトコル。契約内容の変更手段として、同一の相手と契約内容の変更を行う〈修正〉, 異なる相手と新たに契約を結び直す〈再契約〉, そして契約を破棄してセンサデータの流通を停止する〈解消〉を実施する。このプロトコルの適用により、提供ポリシーや利用者要求の変化に応じたサービスの機能・品質の動的制御を実現し、課題 (R2) を解決する。

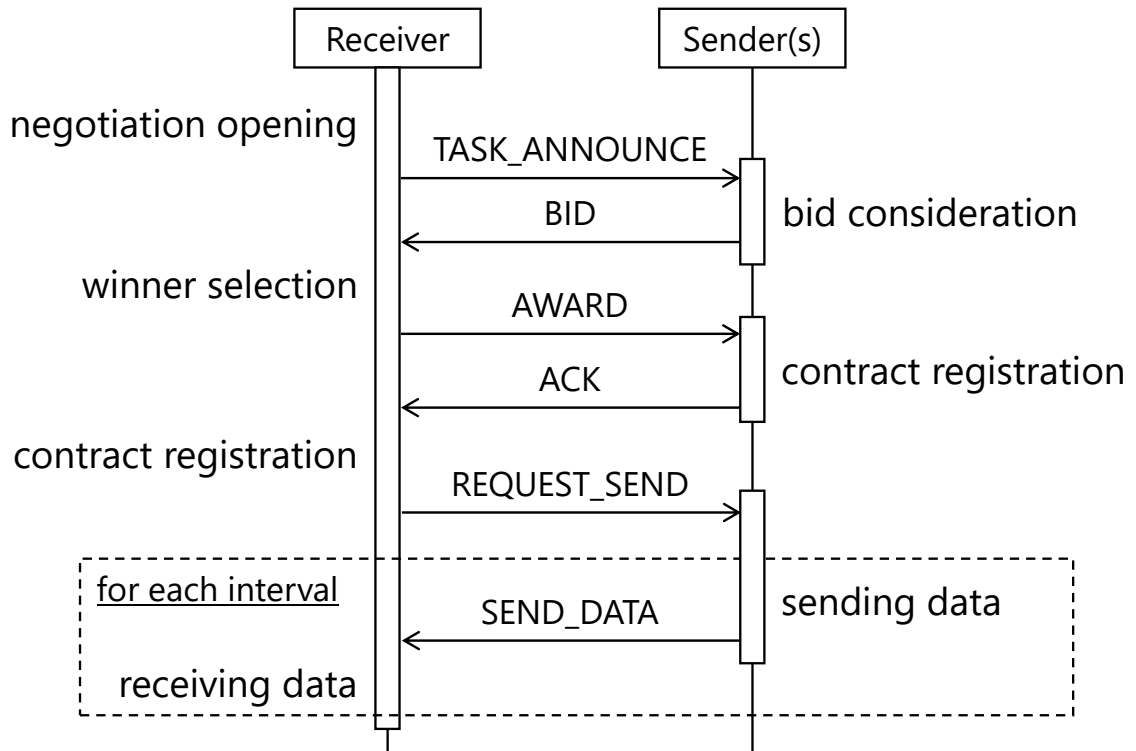


図 3.4 契約締結プロトコルのシーケンスチャート

以降，3.4.1 節で設計した契約を管理するための，構成要素間で交わされる情報流通プロトコルを設計する．

契約締結プロトコル

契約締結プロトコルでは，Sender と Receiver 間での契約締結の流れを定義する．

図 3.4 に契約締結プロトコルのシーケンスチャートを示す．

契約締結プロトコルでは，Receiver.Policy を周囲の Sender(s) に提示し，契約締結の可否を問う (TASK_ANNOUNCE)．提示する Sender(s) は，既知であればその Sender のみ，そうでなければ Receiver.Policy.Area 内の全ての Sender とする．この時の地理範囲検索はオーバーレイ層の機能によって実現する．Sender(s) は，提示された Receiver.Policy と，自身の Sender.Policy について以下の比較を行い，契約の締結可否の判定を行う．

Receiver が Sender の要求を満たすか判定：

$$\text{Receiver.Policy.Scope} \subseteq \text{Sender.Policy.Scope}$$

$\text{Receiver.Policy.Frequency} \subseteq \text{Sender.Policy.Frequency}$

$\text{Receiver.Location} \in \text{Sender.Policy.Area}$

$\text{Sender.WhiteList} \neq \emptyset \wedge \text{Receiver} \in \text{Sender.WhiteList}$

(直接契約の締結時) *Sender* が *Receiver* の要求を満たすか判定 :

$\text{Sender.DataType} = \text{Receiver.DataType}$

$\text{Sender.Location} \in \text{Receiver.Policy.Area}$

(多段契約の締結時) 多段契約が可能か判定 :

$\text{RelayContract.Condition.Scope} \neq \text{Scope.PRIVATE}$

$\text{Sender.Policy.Area} \subseteq \text{RelayContract.Condition.Area}$

(多段契約の締結時) 上記の判定を *RelayContract* に対しても実行 :

$\text{Receiver.Policy.Scope} \subseteq \text{RelayContract.Condition.Scope}$

$\text{Receiver.Policy.Frequency} \subseteq \text{RelayContract.Condition.Frequency}$

$\text{Receiver.Location} \in \text{RelayContract.Condition.Area}$

$\text{RelayContract.DataType} = \text{Receiver.DataType}$

$\text{RelayContract.SourceSender.Location} \in \text{Receiver.Policy.Area}$

以上のすべての条件を満たす時, *Sender* は契約の締結が可能であると判断し, *Receiver* に対して入札する *Contract* を以下に従って作成する.

$\text{Contract.ID} \leftarrow \text{generateId}()$

$\text{Contract.DataType} \leftarrow \text{Sender.DataType}$

$\text{Contract.Receiver} \leftarrow \text{Receiver}$

$\text{Contract.Sender} \leftarrow \text{Sender}$

$\text{Contract.Condition.Scope} \leftarrow \text{Sender.Policy.Scope}$

$\text{Contract.Condition.Frequency} \leftarrow \text{Receiver.Policy.Frequency}$

$\text{Contract.Condition.Area} \leftarrow \text{Sender.Policy.Area}$

直接契約時 :

$\text{Contract.SourceSender} \leftarrow \text{Sender}$

多段契約時 :

$\text{Contract.SourceSender} \leftarrow \text{RelayContract.SourceSender}$

これにより、任意の契約 `contract` と、任意の多段契約における上位契約 `contractA` と下位契約 `contractB` について以下の大小関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} \text{contract.SourceSender.Policy} &\supseteq \text{contract.Sender.Policy} \\ &\supseteq \text{contract.Receiver.Policy} \\ \text{contractA.Condition} &\supseteq \text{contractB.Condition} \end{aligned}$$

入札を行う契約について、`Contract.Condition.Scope = Scope.PROTECTED` の際は、`SourceSender` へ通知を行い認証を受ける。`SourceSender` は `SourceSender.Policy` や `SourceSender.WhiteList` に基いて利用者を認証し、その結果を共有グループ情報として通知する。この時、`SourceSender` から認証を受けられなかった `Contract` は入札候補から除外する。

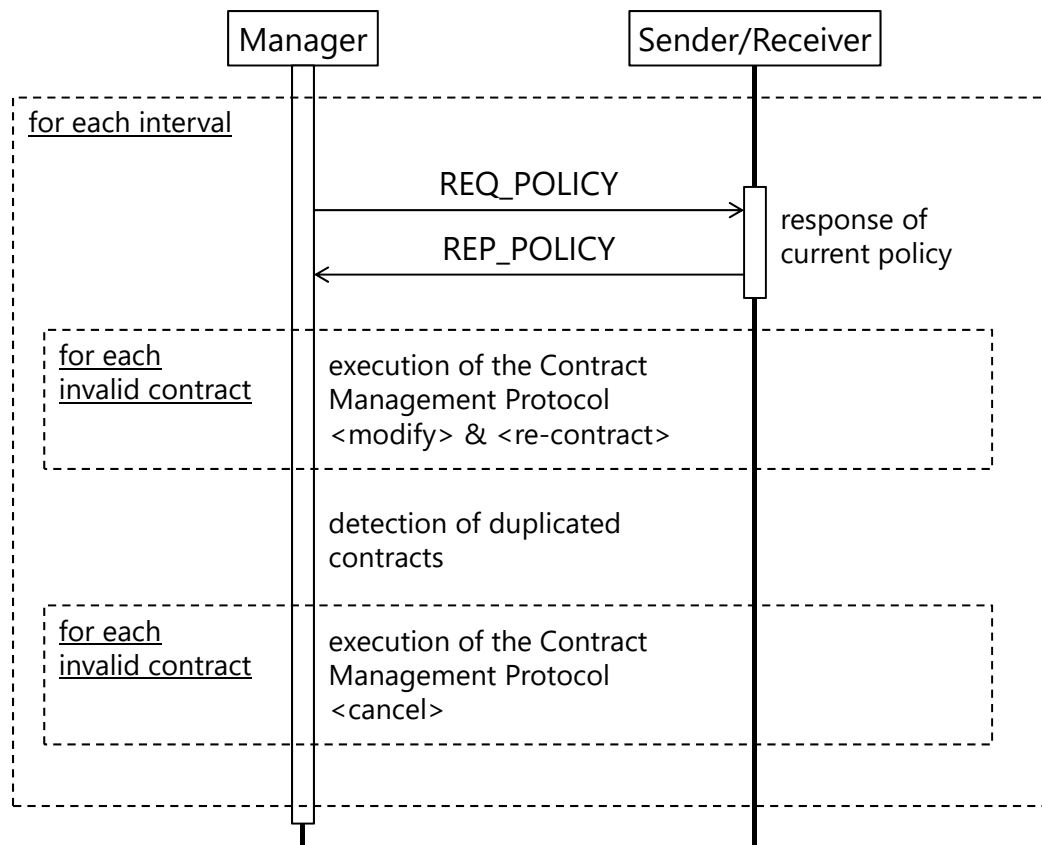
また、`SourceSender` からの認証を受けた時点で複数の入札候補が存在する場合、重複契約の検出を行い、最も良い流通条件を持つ契約以外を入札候補から除外する。その後、残った入札候補を `BID` として `Receiver` に対して通知する (`BID`)。

`BID` を受け取った `Receiver` は、複数の `Sender` から収集した `BID` を集約し、同様に重複契約が検出されると最も良い流通条件を持つ契約以外を契約候補から除外する。最終的に残った契約候補について契約関係が締結され、その旨が `Sender` に対して通知される (`AWARD`)。その後、契約内容の登録を `Manager` に対して行い、データ送信のリクエストを通知する (`REQUEST_SEND`)。リクエストを受け取った `Sender` は登録した契約内容に基いた周期で `Receiver` に対してセンサデータの提供を開始する (`SEND_DATA`)。

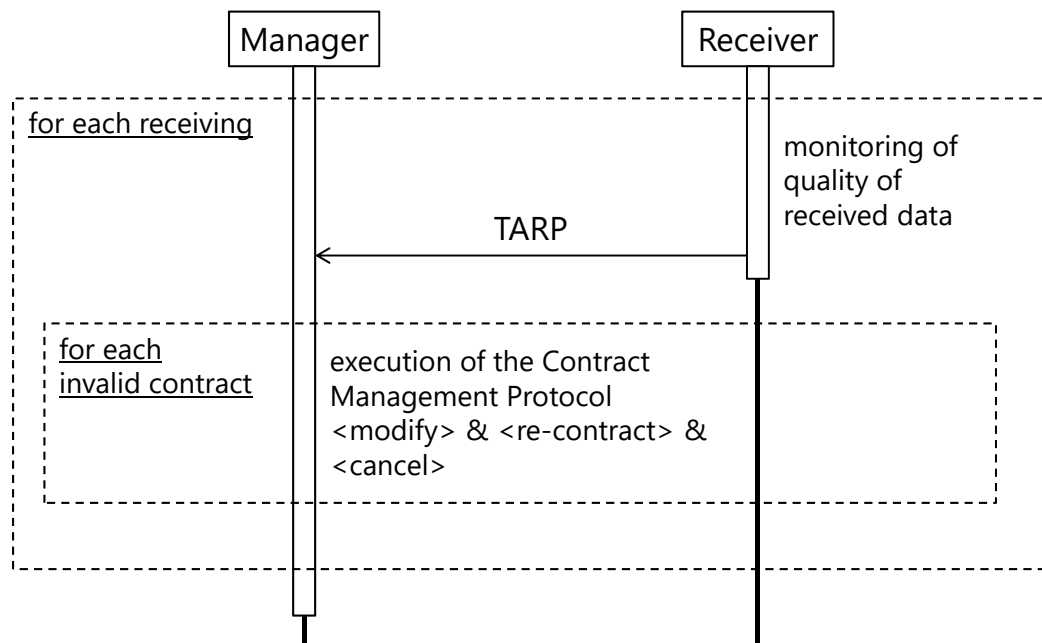
契約内容変更プロトコル

契約内容変更プロトコルでは、締結された契約内容の変更の必要性を検知し、変更を施す流れを定義する。図 3.5 に契約内容変更プロトコルにおける監視時のシーケンスチャートを示す。

図 3.5(a) の `Manager` による契約履行の監視では、一定周期ごとに `Manager` が契約の履行状況を監視する。まず、`Manager` は自身に登録された `Contract` を締結している `Sender` (または `Receiver`) に現在のポリシーを問い合わせる (`REQ_POLICY`)。 `Manager`



(a) Manager による契約内容変更プロトコル



(b) Receiver による契約内容変更プロトコル

図 3.5 契約内容変更プロトコル（監視）のシーケンスチャート

は、その応答 (REP_POLICY) による Policy と、登録されている Contract.Condition について以下の比較を行い、*modify* および *cancel* のフラグを用いて契約内容変更の必要性を判断する。

(監視対象が *Receiver* 時) 契約条件の違反を検出：

$$\begin{aligned} \text{Receiver.Policy.Scope} \supset \text{Contract.Condition.Scope} &\Rightarrow \text{modify} \leftarrow \text{TRUE} \\ \text{Receiver.Policy.Frequency} \neq \text{Contract.Condition.Frequency} \\ &\Rightarrow \text{modify} \leftarrow \text{TRUE} \\ \text{Receiver.Location} \notin \text{Contract.Condition.Area} &\Rightarrow \text{modify} \leftarrow \text{TRUE} \end{aligned}$$

(監視対象が *Sender* 時) 契約条件の違反を検出：

$$\begin{aligned} \text{Sender.Policy.Scope} \neq \text{Contract.Condition.Scope} &\Rightarrow \text{modify} \leftarrow \text{TRUE} \\ \text{Sender.Policy.Frequency} \subset \text{Contract.Condition.Frequency} \\ &\Rightarrow \text{modify} \leftarrow \text{TRUE} \\ \text{Sender.Policy.Area} \neq \text{Contract.Condition.Area} &\Rightarrow \text{modify} \leftarrow \text{TRUE} \\ \text{Sender.WhiteList} \neq \emptyset \wedge \text{Contract.Receiver} \notin \text{Sender.WhiteList} \\ &\Rightarrow \text{cancel} \leftarrow \text{TRUE} \end{aligned}$$

(監視対象が *Sender* かつ多段契約の締結時) *RelayContract* に伴う違反を検出：

$$\begin{aligned} \text{Contract.SourceSender} \neq \text{Contract.Sender} \wedge \text{RelayContract} = \text{NULL} \\ &\Rightarrow \text{cancel} \leftarrow \text{TRUE} \\ \text{RelayContract.Condition.Scope} = \text{Scope.PRIVATE} &\Rightarrow \text{cancel} \leftarrow \text{TRUE} \\ \text{Sender.Policy.Area} \supset \text{RelayContract.Condition.Area} &\Rightarrow \text{cancel} \leftarrow \text{TRUE} \end{aligned}$$

一方、図 3.5(b) の Receiver による契約履行の監視では、契約に基づくセンサデータを受信するごとに以下の比較を行い、契約内容変更の必要性を判断する。なお、*recvTime* はメッセージを受信した時間、*lastRecvTime* はそれぞれ 1 つ前に受信したメッセージを受信した時間、*lastValue* は 1 つ前に獲得したセンサデータを意味する。

$$\begin{aligned} \text{Value.DataType} \neq \text{Contract.DataType} &\Rightarrow \text{modify} \leftarrow \text{TRUE} \\ \text{Value.Location} \notin \text{Receiver.Policy.Area} &\Rightarrow \text{modify} \leftarrow \text{TRUE} \\ \text{Value.Timestamp} - \text{lastValue.Timestamp} > \text{Contract.Condition.Frequency} * 2 \\ &\Rightarrow \text{modify} \leftarrow \text{TRUE} \end{aligned}$$

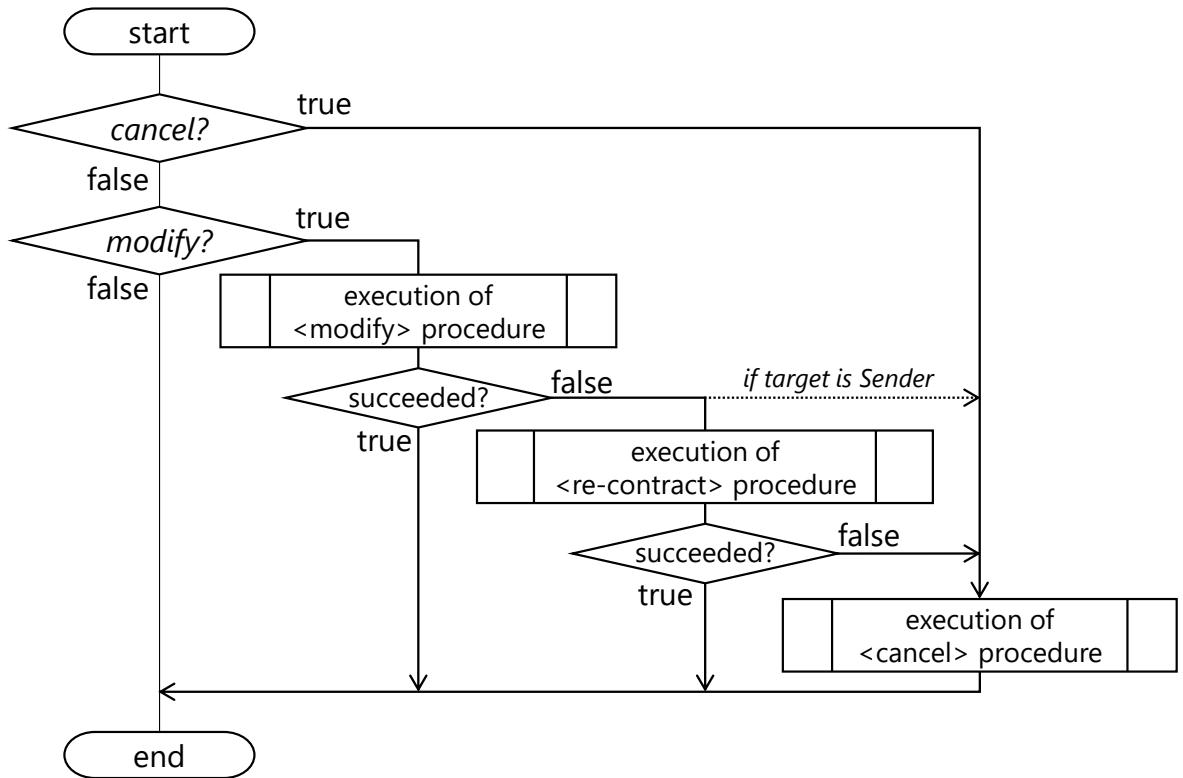


図 3.6 契約内容変更プロトコルにおける意思決定フローチャート

$\text{Value.SourceSender} \neq \text{Contract.SourceSender} \Rightarrow \text{modify} \leftarrow \text{TRUE}$

$\text{recvTime} - \text{lastRecvTime} > \text{Contract.Condition.Frequency} * 2$

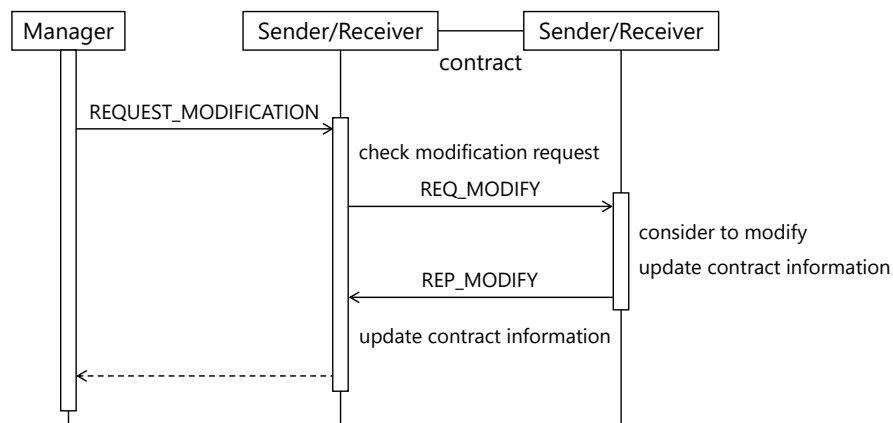
$\Rightarrow \text{modify} \leftarrow \text{TRUE}$

$\text{Message.src} \neq \text{Contract.Sender} \Rightarrow \text{modify} \leftarrow \text{TRUE}$

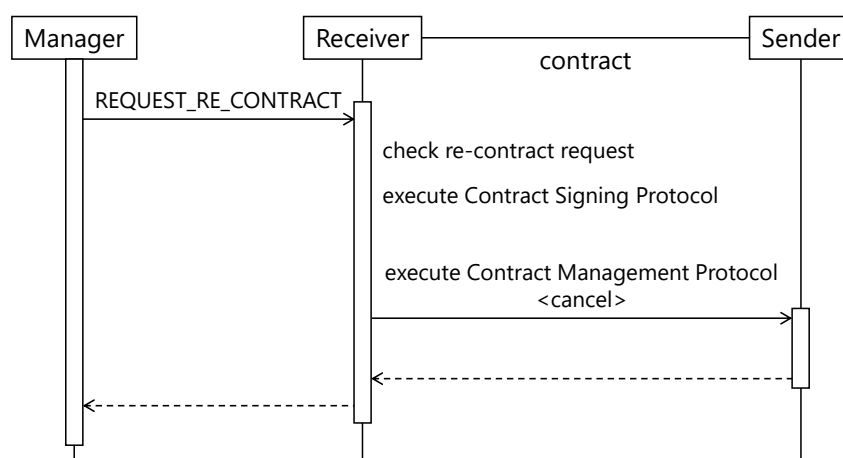
$\text{Message.Location} \notin \text{Receiver.Policy.Area} \Rightarrow \text{modify} \leftarrow \text{TRUE}$

契約内容変更の必要性を判断した後に、Manager は図 3.6 に従って契約内容の変更手順を決定する。〈修正〉・〈再契約〉・〈解消〉それぞれのシーケンスチャートを図 3.7 に示す。

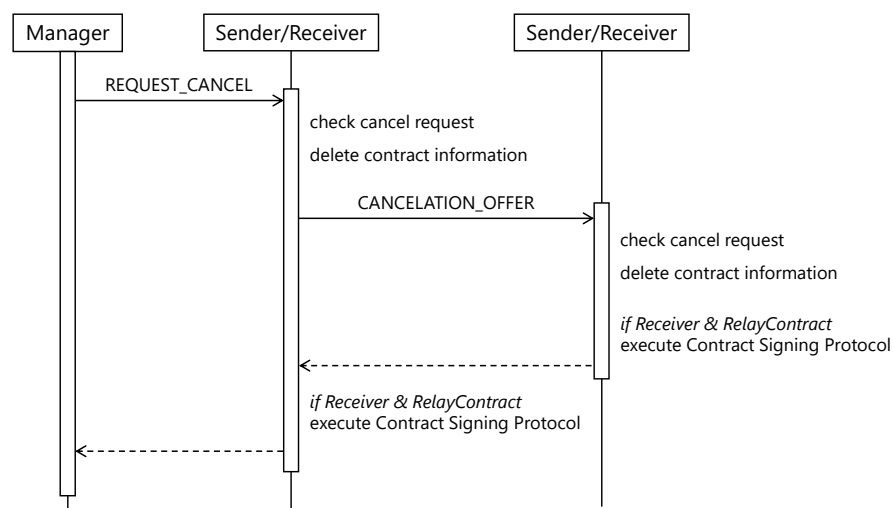
なお、図 3.7(c) において多段契約が解消された際、Receiver は SouceSender との直接契約を契約締結プロトコルによって依頼する。こうすることで、データの中継者のポリシー変更等で多段契約が全て解消してしまったとしても、改めて SouceSender との契約



(a) 〈 修正 〉



(b) 〈 再契約 〉



(c) 〈 解消 〉

図 3.7 契約内容変更プロトコルのシーケンスチャート

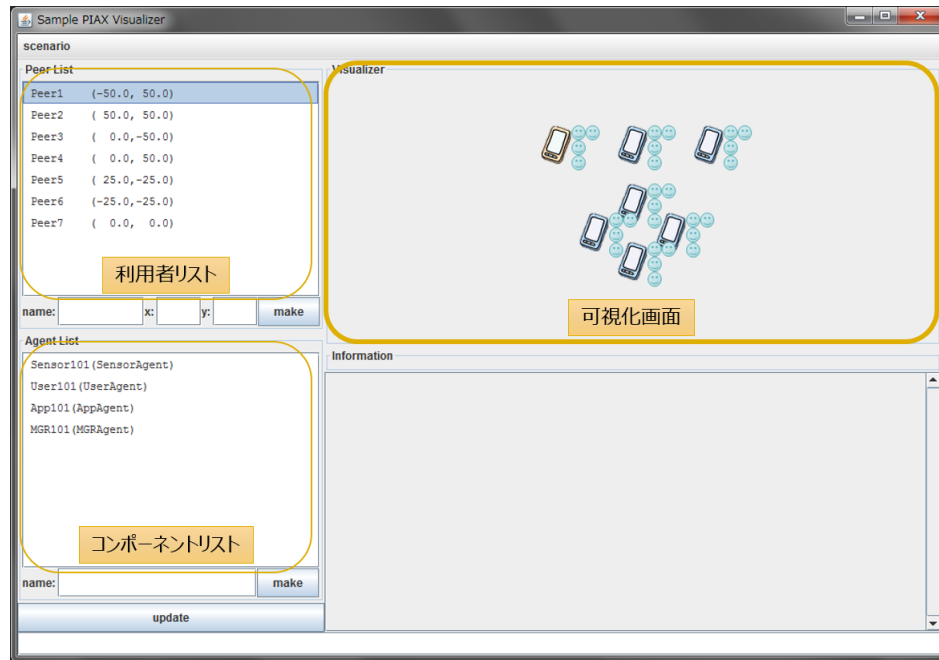


図 3.8 評価用アプリケーション

を引き継ぐことが可能となる。

契約内容の変更が完了した後、Manager は更新された契約に対して重複契約を検出し、最も良い条件の契約を残して他の契約の解消を行う。

3.5 評価

3.5.1 COSAP の動作検証

本実験では、COSAP と CIFP の有効性を確認するため、様々なポリシーを持つ利用者間でデータを流通させ、それらが環境の変動（利用者の追加・削除、ポリシーの変更）によって正しく制御されるか確認する。なお、実験は自作のシミュレータおよび Android 端末を用いて行った。

シミュレータによる動作検証

実験にあたり、COSAP のシミュレーション実験のための評価用アプリケーションを実装した（図 3.8）。本シミュレータでは各端末は実際に IP 通信により他端末と通信しダ

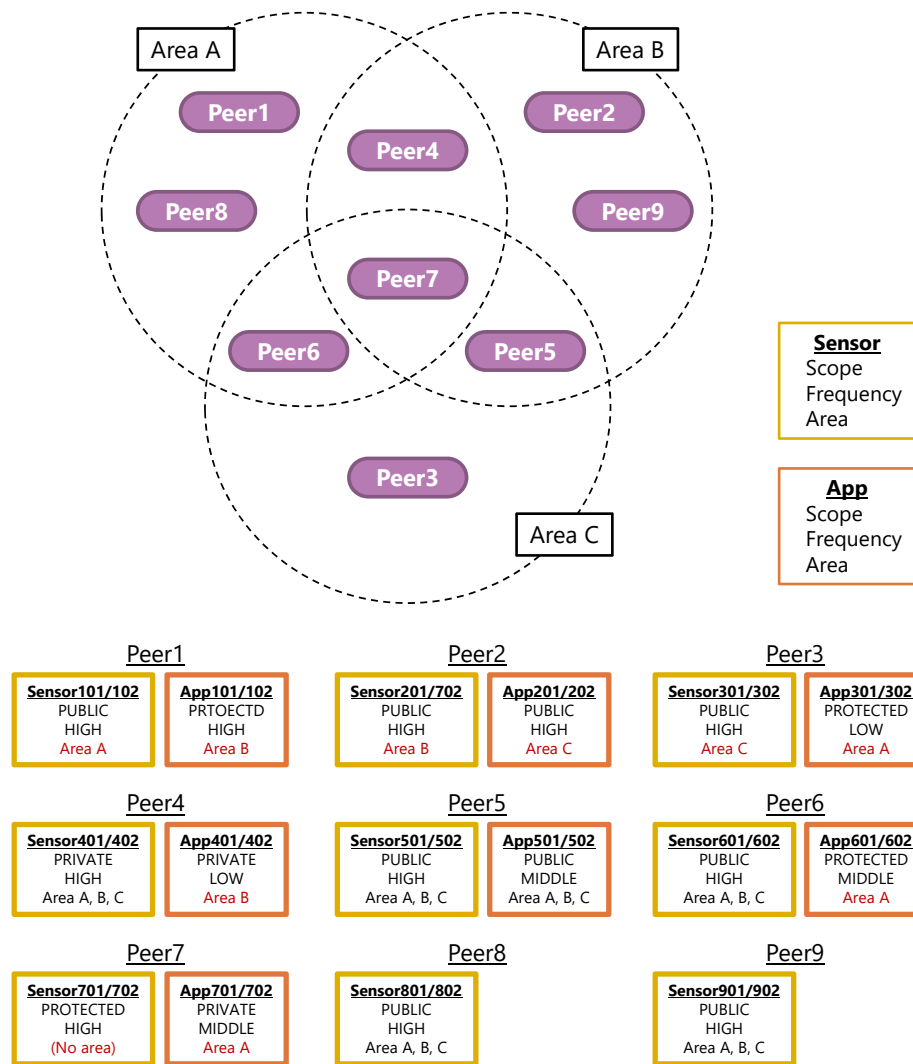


図 3.9 COSAP の動作検証（シミュレータ）の想定環境

ミーデータの送受信を行う。各端末の操作は CUI ベースで指定の他、指定のフォーマットで記述したシナリオファイルを読み込ませることで行う。

図 3.9 に本実験の想定環境を示す。想定環境では、利用者は 9 人存在し（Peer1～Peer9）、エリア A・エリア B・エリア C の 3 つに区分されたそれぞれのエリアに駐在している。それぞれの Peer は自身のデバイスに 2 種類のセンサデータを収集するセンサが搭載されており（Sensor101, Sensor102, ..., Sensor902）、利用者それぞれのポリシーを設定する。このとき、一部の利用者（Peer1～Peer3）は自身のセンサの消費電力を抑えるために、提供範囲を自分のいるエリアに限定する。また、Peer7 はプライバシーの保護のため、知人の利用者（Peer1, Peer2, Peer3, Peer6）へのセンサデータの提供に限定する。

用いたシナリオは以下の通り.

1. Peer1~Peer7 がセンサを 2 台ずつ計 14 台登録する (Sensor101~Sensor702)
2. Peer1~Peer7 がアプリケーションを構築する (App101~App701)
3. 各々のアプリケーションを 30 秒間利用する (環境 1)
4. 以下の環境変更を実行する
 - Sensor301 の Scope を PRIVATE に変更する
 - Sensor401 の Scope を PUBLIC に変更する
 - Sensor501 の提供頻度を MIDDLE に引下げ
 - Sensor601 の提供頻度を MIDDLE に引下げ
 - Peer7 が 2 台のセンサの登録を解除する (Sensor701, Sensor702)
 - 新たに Peer8 が 2 台のセンサをエリア A に登録する (Sensor801, Sensor802)
 - 新たに Peer9 が 2 台のセンサをエリア B に登録する (Sensor901, Sensor902)
5. 各々のアプリケーションを 30 秒間利用する (環境 2)

また, 実験にあたって設定したパラメータは以下の通り.

- `Frequency.HIGH` = 1,000 (ms)
- `Frequency.MIDDLE` = 2,000 (ms)
- `Frequency.LOW` = 4,000 (ms)
- $\alpha = 0.5$

ここで, パラメータ α は, 基本契約プロトコルにおいて, 収集した BID から最も良い流通条件の契約を選ぶ際, 流通条件が同じ直接契約と多段契約が存在した際に多段契約を選択する割合である. すなわち, $\alpha = 0.0$ であればすべての契約が直接契約となり, $\alpha = 1.0$ であれば可能なだけ多段契約を締結する.

なお, 本実験ではそれぞれの環境において締結された契約をもとに評価を行う. 契約の締結時, 及び契約内容の修正時のメッセージの流通や経過時間等については以降の節で分析する. また, Sensor, App の名称について, 各コンポーネントの数値の 1 桁目が

表 3.8 動作検証（シミュレータ）の実験結果（環境 1）

Contract chain	
Sensor101 - App601	Sensor102 - App602
Sensor101 - App701	Sensor102 - App702
Sensor201 - App401	Sensor202 - App402
Sensor201 - App501	Sensor202 - App502
Sensor301 - App501	Sensor302 - App502
Sensor401 - App401	Sensor402 - App402
Sensor401 - App701	Sensor402 - App702
Sensor501 - App201 - App101	Sensor502 - App202 - App102
Sensor501 - App201 - App401	Sensor502 - App202 - App402
Sensor501 - App501	Sensor502 - App502
Sensor601 - App201	Sensor602 - App202 - App502
Sensor601 - App301	Sensor602 - App302
Sensor601 - App501	Sensor602 - App602
Sensor601 - App601	Sensor602 - App702
Sensor601 - App701	Sensor702 - App102 - App302
Sensor701 - App101 - App301	Sensor702 - App102 - App602
Sensor701 - App101 - App601	

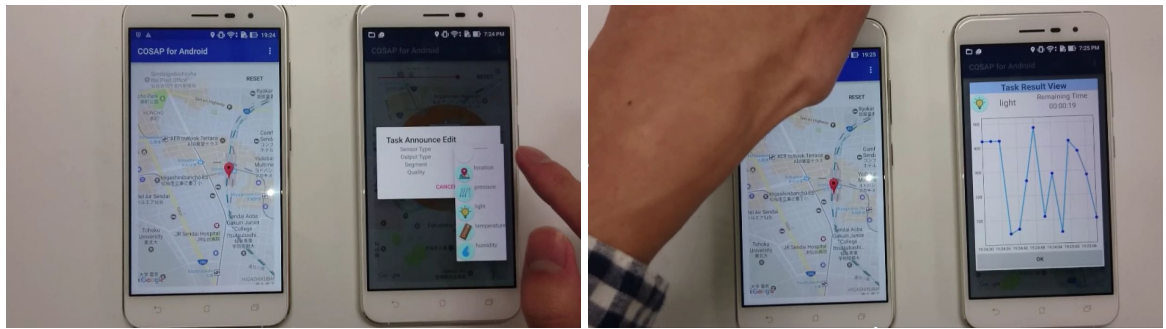
DataType を表すものとする。

表 3.8 と表 3.9 に、それぞれの環境において締結された契約を表す。表では、契約関係が結ばれたコンポーネント同士をハイフンで繋ぎ、左側が Sender、右側が Receiver とした。

表より、環境 1 においては 38 契約、環境 2 においては 46 契約が締結された。また、それぞれの契約は、下一桁が一致する（DataType が等しい）コンポーネント間で締結された。

表 3.9 動作検証（シミュレータ）の実験結果（環境 2）

Contract chain	
Sensor101 - App601	Sensor102 - App602
Sensor101 - App701	Sensor102 - App702
Sensor201 - App401	Sensor202 - App402
Sensor201 - App501	Sensor202 - App502
Sensor401 - App101	Sensor302 - App502
Sensor401 - App301	Sensor402 - App402
Sensor401 - App401	Sensor402 - App702
Sensor401 - App501	Sensor502 - App202 - App102
Sensor401 - App601	Sensor502 - App202 - App402
Sensor401 - App701	Sensor502 - App502
Sensor501 - App401	Sensor602 - App202 - App502
Sensor501 - App501	Sensor602 - App302
Sensor601 - App301	Sensor602 - App602
Sensor601 - App501	Sensor602 - App702
Sensor601 - App601	Sensor802 - App302
Sensor601 - App701	Sensor802 - App502
Sensor801 - App301	Sensor802 - App602
Sensor801 - App501	Sensor802 - App702
Sensor801 - App601	Sensor902 - App102
Sensor801 - App701	Sensor902 - App402
Sensor901 - App101	Sensor902 - App502
Sensor901 - App401	
Sensor901 - App501	



(a) アプリケーション登録時

(b) アプリケーション利用時

図 3.10 動作検証（実端末）の実験結果

実端末を用いた動作検証

実験にあたり，COSAP および CIFP の実現可能性を検証するため，これまでの設計に基づいて Android 端末上に COSAP を実装した．流通データは端末内蔵のセンサデータとし，実装に際し DataType の要素として以下を設定した．

LOCATION : GPS センサ

LIGHT : 照度センサ

PRESSURE : 圧力センサ

HUMIDITY : 湿度センサ

TEMPERATURE : 温度センサ

実験シナリオは以下の通り．

1. Android 端末 2 台で COSAP を起動する（端末 1，端末 2）
2. 端末 1 が照度センサを登録する
3. 端末 2 が照度センサを収集するアプリケーションを登録する
4. アプリケーションを 30 秒間起動する

結果を図 3.10 に示す．端末 2（右）によるアプリケーション登録後，生成されたコンポーネント間の契約締結によりセンサデータの流通経路が動的に構築され，端末 1（左）から照度センサの値をリアルタイムで受信できていることを確認した．

3.5.2 契約締結プロトコルの性能評価

概要

本実験では、契約締結プロトコルについて、契約の形態の違いによる、各コンポーネントの負荷や流通データの品質を評価する。

利用者は6人存在し (Peer1~Peer6), Peer1 がセンサデータの提供者, Peer2~Peer6 がセンサデータの利用者として振る舞う。Peer1 が提供するセンサは1台 (Sensor101) であり、提供ポリシー {PUBLIC, HIGH, 全エリア} を持つ。また、Peer2~Peer6 は各々20台のアプリケーションを構築し、全てにおいて共通の利用者要求 {PUBLIC, HIGH, 全エリア} を持つ。

評価に用いたシナリオは以下の通り。

1. Peer1 がセンサを1台登録する (Sensor101)
2. Peer1~Peer6 が各々20台のアプリケーションを構築する (App201~App220, ..., App601~App620)
3. 各々のアプリケーションを30秒間利用する

比較対象としては、 $\alpha = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ に設定した際のデータの流通について分析し、以下の評価項目を用いて契約締結プロトコルを評価した。

送信回数の **Fairness Index (FI)** [59] : 負荷の分散度を示す正規化された指標であり以

下の式で定義する。なお、 n はコンポーネント数、 x_i はコンポーネント i のデータ送信回数を表す。

$$FI := \frac{(\sum x_i)^2}{n \sum x_i^2}$$

受信データの受信間隔 : 契約に基づくデータ (SEND_DATA) を受信した時間の間隔。

$$\text{recvTime} - \text{lastRecvTime}$$

受信データの生成間隔 : 受信したデータが生成された時間の間隔。

$$\text{Value.Timestamp} - \text{lastValue.Timestamp}$$

表 3.10 実験結果（契約締結プロトコルの性能評価）

α	FI	受信間隔		生成間隔		鮮度	
		(avg)	(std)	(avg)	(std)	(avg)	(std)
1.0	0.321	1000.012	4.968	1000.223	29.695	1637.236	23.688
0.8	0.160	999.982	4.776	1000.680	43.470	1386.210	27.277
0.6	0.080	1000.013	4.561	1001.572	42.219	687.266	27.431
0.4	0.031	999.938	5.405	999.947	5.189	247.690	2.359
0.2	0.016	999.975	5.222	1000.012	4.973	0.062	0.267
0.0	0.010	1000.039	4.559	1000.051	4.432	0.040	0.161

受信データの鮮度：データを受信した時間と、データが生成された時間の間隔。この値が大きいほど古いデータが流通していることを意味し、鮮度が低下していると表現する。

$$\text{recvTime} - \text{Value.Timestamp}$$

また、本実験では契約内容変更プロトコルを OFF とし、以下のパラメータを設定した。

- Frequency.HIGH = 1,000 (ms)
- Frequency.MIDDLE = 2,000 (ms)
- Frequency.LOW = 4,000 (ms)
- $\alpha = 0.5$

実験結果

実験結果を表 3.10 に示す。

表より、多段契約を優先するほど FI が増加したことから、多段契約の導入によってデータ流通のために必要な通信コストをコンポーネント間で分散することができたが、一方で、多段契約を優先するほど鮮度が低下した。これは、多段契約の段数が増加するに伴って古いデータを転送していることに起因している。図 3.11 に、 $\alpha = 1.0$ における契

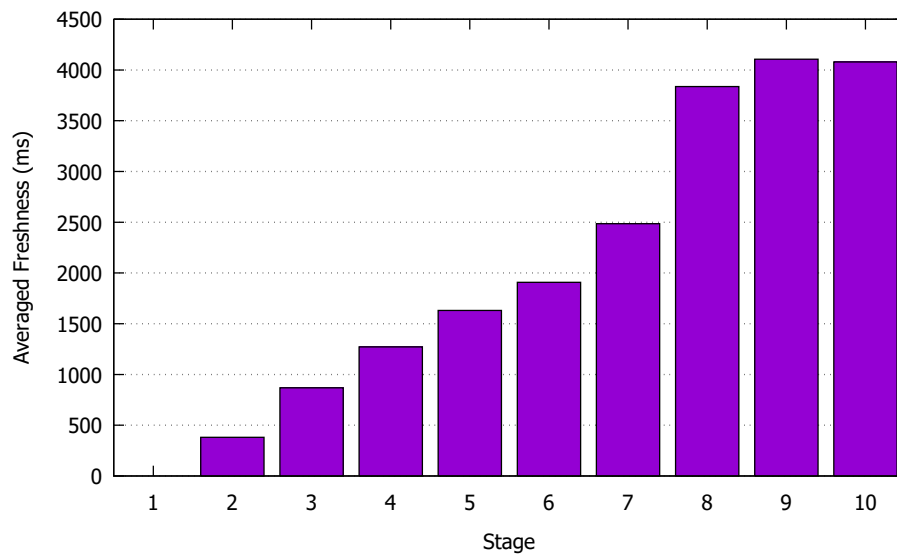


図 3.11 契約段数毎の鮮度の平均 ($\alpha = 1.0$).

表 3.11 契約段数毎の同じデータの誤送信数

段数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
誤送信数	0	3	16	3	0	0	0	0	0	-

約段数毎の鮮度の平均を示す．図より，Sender から直接データを受信している 1 段目の Reveiver が得るデータの鮮度は 0 であるが，段数の増加にともなって鮮度の値も増加していることが分かる．この原因として，データの中継者であるコンポーネントが，前段の契約でデータを受信するタイミングと，後段の契約でデータを送信するタイミングに同期が取られていないため，そのタイミングのずれの分だけ遅延が蓄積されることが挙げられる．蓄積される遅延は契約を締結するタイミングに依存するためコンポーネントにより差異があるが，1 段あたりで蓄積される遅延の最大値は概ねデータの送受信頻度である 1,000 ms となる．

また，多段契約を優先するほど生成間隔の標準偏差と頻度の標準偏差が増大した．これは，データの中継者がデータを転送する際に前回送ったデータと同じデータを誤送信していることに起因している．表 3.11 に， $\alpha = 1.0$ における契約段数毎の同じデータの誤送信数を示す．表より，契約段数に依らずにデータの誤送信が行われたことが分かる．

この原因として、前述の通りデータの中継者であるコンポーネントの送受信のタイミングに同期が取られていないため、それらのタイミングが非常に近い場合において、前段の契約で新たなデータを受信する前に後段の契約で新しいデータを送信する処理が行われてしまうことが挙げられる。

3.5.3 契約内容変更プロトコルの性能評価

概要

本実験では、契約内容変更プロトコルについて、契約内容の変更手段の違いによる、契約内容の変更完了までにかかる時間と締結される契約数について評価する。

利用者は6人存在し(Peer1~Peer6), Peer1 がセンサデータの提供者, Peer2~Peer6 がセンサデータの利用者として振る舞う。Peer1 が提供するセンサは2台あり (Sensor101, Sensor102), Sensor101 は提供ポリシー {PUBLIC, MIDDLE, 全エリア} を, Sensor102 は提供ポリシー {PUBLIC, LOW, 全エリア} を持つ。また, Peer2~Peer6 は各々 10 台のアプリケーションを構築し, 全てにおいて共通の利用者要求 {PUBLIC, MIDDLE, 全エリア} を持つ。

評価に用いたシナリオは以下の通り。

1. Peer1 がセンサを 2 台登録する (Sensor101, Sensor102)
2. Peer2~Peer6 が各々 10 台のアプリケーションを構築する (App201~App210, ..., App601~App610)
3. 各々のアプリケーションを 30 秒間利用する (環境 1)
4. 環境変化として以下の設定変更を実施
 - Sensor102 の提供頻度 (Policy.Frequency) を LOW から HIGH に変更
 - App201~App310 の希望頻度 (Policy.Frequency) を MIDDLE から LOW に変更
 - App401~App610 の希望頻度 (Policy.Frequency) を MIDDLE から HIGH に変更

5. 各々のアプリケーションを 30 秒間利用する（環境 2）

比較対象として、以下のケースを想定した。

Case A : 契約内容の変更手段として、〈修正〉, 〈再契約〉, 〈解消〉を実行する

Case B : 契約内容の変更手段として、〈修正〉, 〈解消〉を実行する

Case C : 契約内容の変更手段として、〈解消〉を実行する

上記の各ケースについてシナリオを実行後、以下の項目によって契約内容変更プロトコルを評価した。

契約締結数 : 契約内容の変更後に締結されている契約数。

ポリシー変更検出時間 : ポリシーの変更から契約内容の変更が開始されるまでの時間。コンポーネントが SET_POLICY メッセージを受信してから REQUEST_MODIFICATIAON, REQUEST_RE_CONTRACT または REQUEST_CANCEL メッセージを初めて受信するまでの時間を計測する。

契約変更実施時間 : 契約内容の変更が開始されてから終了するまでの時間。コンポーネントが初めて REQUEST_MODIFICATIAON, REQUEST_RE_CONTRACT または REQUEST_CANCEL メッセージを受信してから最後にそれらのシーケンスが終了するまでの時間を計測する。

ポリシー違反数 : 古いポリシー情報に基づいて流通されたデータの数。

また、実験にあたって設定したパラメータは以下の通り。

- Frequency.HIGH = 1,000 (ms)
- Frequency.MIDDLE = 2,000 (ms)
- Frequency.LOW = 4,000 (ms)
- $\alpha = 0.5$
- MGR の監視周期 = 2,000 (ms)

表 3.12 実験結果（契約内容変更プロトコルの性能評価：Case A）

契約締結数	平均ポリシー変更検 出時間 (ms)	平均契約変更実施時 間 (ms)	流通データのポリ シー違反数
50→50	1079.788	52.970	9
50→50	1246.719	164.344	14
50→50	1084.324	91.559	9
50→50	1053.000	84.606	11
50→50	1201.433	109.833	11

表 3.13 実験結果（契約内容変更プロトコルの性能評価：Case B）

契約締結数	平均ポリシー変更検 出時間 (ms)	平均契約変更実施時 間 (ms)	流通データのポリ シー違反数
50→29	1952.658	11.395	18
50→23	867.750	9.063	11
50→27	870.563	14.906	3
50→26	390.923	20.731	5
50→27	953.281	13.313	8

実験結果

表 3.12, 表 3.13, 表 3.14 に, 各ケースについて 5 回ずつ試行した際の実験結果を示す.

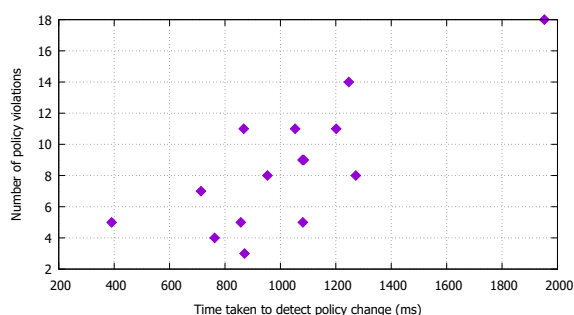
Case A については, 契約締結数は環境変化前後で変わらず 50 契約であり, ポリシー変更検出時間は概ね 1,000 ms だった. また, 契約変更実施時間はポリシー変更検出時間の 10 分の 1 程度の 100 ms であり, 流通データのポリシー違反数は 10 前後だった. Case B については, 契約締結数は環境変化後に約半分となり, ポリシー変更検出時間は多少ばらつきはあるものの概ね平均して 1,000 ms だった. 契約変更実施時間は 15 ms 前後であり, 流通データのポリシー違反数は 10 前後だった. Case C については, 契約締結数

表 3.14 実験結果（契約内容変更プロトコルの性能評価：Case C）

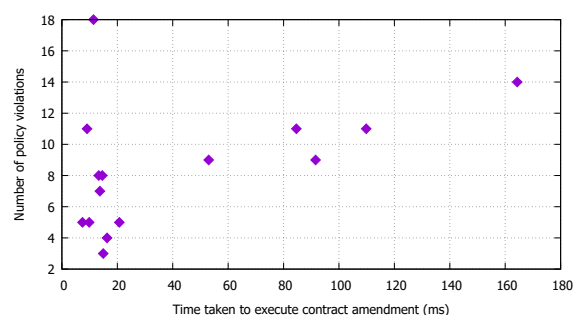
契約締結数	平均ポリシー変更検 出時間 (ms)	平均契約変更実施時 間 (ms)	流通データのポリ シー違反数
50→05	856.886	7.429	5
50→02	762.595	16.297	4
50→04	1081.118	9.853	5
50→08	713.375	13.719	7
50→06	1272.108	14.568	8

表 3.15 実験結果（契約内容変更プロトコルの性能評価：全 Case）

Case	契約締結数	平均ポリシー変更 検出時間 (ms)	平均契約変更実施 時間 (ms)	流通データのポリ シー違反数
Case A	50→50	1130.784	100.043	10.8
Case B	50→26	1065.600	13.531	9.0
Case C	50→05	942.063	12.434	5.8



(a) ポリシー変更検出時間との相関



(b) 契約変更実施時間との相関

図 3.12 ポリシー違反数と各時間の相関

は環境変化後に激減して 5 程度となり，ポリシー変更検出時間は他のケースと変わらず概ね平均して 1,000 ms だった．契約変更実施時間は 15 ms 前後であり，流通データのポリシー違反数は 5 前後だった．

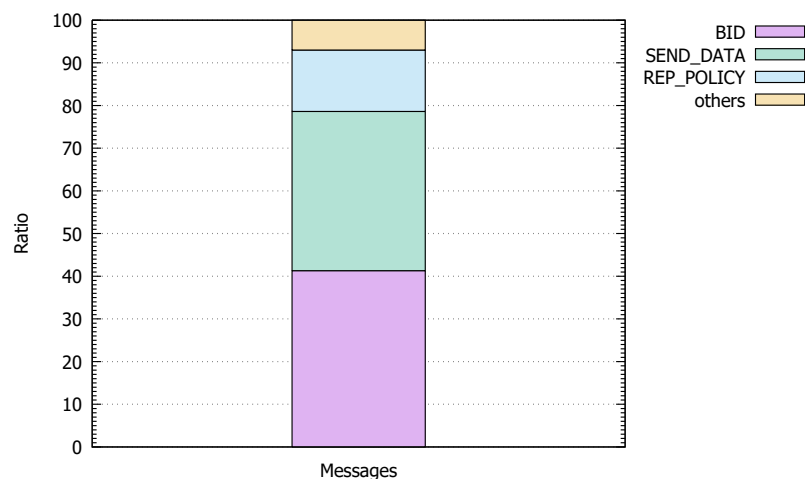


図 3.13 App 201 の送信メッセージ量の割合 (Case A)

表 3.15 に、各ケース毎に各項目の平均をとったものを示す。契約内容の変更手段として、〈修正〉、〈再契約〉、〈解消〉を実行する Case A が最も契約締結数が多く、それに伴って契約変更実施時間に増加の傾向が見られることが分かった。ポリシー変更検出時間は各ケースに関わらず 1,000 ms 程度であるが、これは MGR による契約履行の監視周期 (2,000 ms 毎) に由来しているためである。また、流通データのポリシー違反数はポリシー変更検出時間の大きさに影響を受け、契約変更実施時間からは大きな影響を受けないことがわかった (図 3.12)。そのため、今回の実験のような 50 台規模の環境であれば、Frequency.HIGH の値を契約変更実施時間の 0.1 秒よりも十分に大きくすることで契約内容の変更中にポリシーの違反はほとんど発生しないことが期待できる。

ポリシー違反数を無くすためには、MGR による監視周期を短くしてポリシー変更検出時間を小さくすることが有効だが、それに伴う通信量の増加は無視できない量となる。図 3.13 に Case A における App201 の送信メッセージ量の割合を示す。図より、MGR の監視周期が Frequency.MIDDLE と同程度であった今回の設定においても、MGR への監視応答メッセージ量は全体の 15% を占めていたことが分かる。そのため、データの流通に直接的に関係のないメンテナンスパケットのこれ以上の増加は好ましくないと考える。

3.5.4 考察

3.5.1 節における動作検証結果から、環境 1 において Sensor101 はエリア A に存在し (Sensor101.Policy.Area = エリア A) かつエリア A のデータを欲する App601 と App701 (App601.Policy.Area = エリア A , App701.Policy.Area = エリア A) と正しく契約が結ばれた。また、多段契約においても、Sensor601 と App201 との契約においては App201 の要求頻度である 1 秒ごとにデータの流通が行われ (App201.Policy.Frequency = HIGH), その下位契約である App201 と App501 との契約においては App501 の要求頻度である 2 秒ごとにデータの流通が行われた (App501.Policy.Frequency = MIDDLE)。その他全ての契約においても同様に両者のポリシーに則ってマッチングがなされて契約関係が締結され、ポリシーに基いたデータの流通が開始されたことを確認した。以上のことから、契約締結プロトコルの適用によって利用者要求を満たしつつ提供者のポリシーに応じたセンサデータの流通を実現し、「(R1) 提供者のポリシーに応じたセンサデータの流通設定が困難」を解決した。また、その後、環境 2 における結果から、Scope を PRIVATE に変更した Sensor301 が、Scope が PUBLIC である App501 との契約を解消したことを確認した。また、Frequency を MIDDLE に引下げた Sensor501 と Sensor602 が、Frequency の HIGH を要求していた App101 と App201 との契約を解消したことを確認した。その他の契約に関しても、ポリシーの変更に応じて正しく契約内容の変更がなされた。以上のことから、提供者のポリシーや環境の変化に応じて柔軟にセンサデータの流通を制御し、「(R2) 提供者のポリシーの変化に応じたサービスの動的制御が困難」を解決した。

次に、3.5.2 節における契約締結プロトコルの性能評価結果から、多段契約を優先するほど FI が増加したことから、多段契約の導入によってデータ流通のために必要な通信コストをコンポーネント間で分散することができた。そのため、センサデータだけではなく、動画データ等の負荷のかかるパブリックデータをコンポーネント間で流通させるような用途への拡張する際に、多段契約の概念は有効であることを確認した。しかし、多段契約の多用によりデータの中継者のデータの送受信タイミングによっては転送データの

鮮度が古くなることや同じデータを誤送信する可能性が高まることがわかった。これらの課題の解決策としては、いずれの課題の原因も多段契約の送受信タイミングであることから、多段契約を締結してデータの送信を開始する際（図 3.4 における SEND_DATA 受信時）に、上位契約である RelayContract における受信タイミングに応じてセンサデータの流通を開始することが有効であることが考えられる。

また、3.5.3 節における契約内容変更プロトコルの性能評価結果から、〈修正〉、〈再契約〉、〈解消〉を実行する契約内容変更プロトコルは契約の管理に有効であり、その実行時間は流通データのポリシー違反数に大きな影響を与えない時間であることがわかった。ポリシー違反数を減らす解決策としては、従来では Receiver がデータを受信する毎に判定していた MGR への TRAP メッセージの送信を、各コンポーネントが自身のポリシーを変更したタイミングでも判定を行うようにし、MGR がポリシーの変更を検知するまでの時間を限りなく小さくすることが有効であると考えられる。

これらのプロトコルの更なる洗練化により、センサデータ以外にもテキストデータやマルチメディアデータ等の容量の大きいデータについても動的な流通経路の構築及び参加者のポリシーに基づいた自律制御が可能になると考えられる。その際、COSAP の適用範囲は 3.3.2 節で述べた応用例に加えて、以下の例が考えられる。

マルチメディアストリーミングシステム：スポーツ会場やライブ会場などの特定のエリアに限定して端末間でマルチメディアデータを共有し、リアルタイムで表示する。従来のマルチメディアストリーミングシステムと比較して、インフラの設置が不要で端末間の D2D 通信で配信するため Quality of Experience (QoE) の向上が期待できる。

観光情報共有システム：観光地などの特定のエリアに限定してその土地に関する口コミ情報を現地にいる利用者同士で共有する。従来の Social Networking Services (SNS) 等を利用した情報共有システムと比較して、その位置にいることそのものがトリガーとなって関連情報が選別されるため利便性の向上が期待できる。

3.6 まとめ

本章では、「課題 B： センサデータ流通基盤の流通経路構築に関する課題」に対して「提案 B： 契約概念に基づくセンサデータ流通基盤 COSAP」を提案した。COSAP では、データ利用者からの利用要求およびデータ提供者の提供ポリシー、そしてそれらの相互作用によって生じるセンサデータ流通経路の構築を契約指向サービス構成モデルとして定義し、マルチエージェントシステム技術を応用した情報流通プロトコル CIFP による自動交渉によって、参加者の煩雑な操作の必要なく、参加者全体から適切なセンサデバイスを発見し、その所有者のポリシーに基づく流通条件および流通経路を決定する。また、参加者間で簡易的なセンサ型アプリケーションを構築しセンサデータを共有するシミュレーション実験を通して、提供者のポリシーに応じた流通経路が参加者間毎に動的に設定されセンサ型アプリケーションが構築できることを示した。以上から、「課題 B： センサデータ流通基盤の流通経路構築に関する課題」を解決し、データ提供者のポリシーを反映したデータの流通経路を構築可能なセンサデータ流通基盤を実現した。

今後の課題として、COSAP で流通可能なセンサデータの拡張を検討する必要がある。特に、COSAP では位置情報や気温情報といったリアルタイムで取得可能な量的データに限定したモデルの構築およびプロトコルの設計を行ったが、アンケート調査への回答といった人そのものをセンサデバイスと見做した際に得られる質的データは PCN で新たに獲得可能となった特徴的なセンサデータであるため、それらに対応させるよう本モデルおよびプロトコルの表現力を汎化させて適切な流通経路を構築できるようにすることで、より多くのユースケースへ対応できるようになることが考えられる。

第 4 章 センサデータ流通基盤の実環境への適用

4.1 はじめに

第 1 章で述べたように，将来の超スマート社会の実現のために，ネットワークを介して接続された多種多様な周囲のセンサデバイスおよび他の IoT システム間で高度に連携協調し，センサデータを横断的に活用して新しい価値やサービスを創出していくことが求められている．また，学術領域におけるセンサデータの利活用を目的としたネットワーク構築においては，あらかじめ存在が既知である専用のセンサデバイスのみの利活用モデル (WMS, WSN, ON) から，自動車や人物の持つ携帯端末といった存在が未知である汎用のセンサデバイスを含めた利活用モデル (VANET, PCN) へ関心がシフトしつつある．今後爆発的に普及が見込まれる IoT デバイスの全てを事前に把握しシステムへ把握することは現実的ではないため，特に人々の移動に伴う未知の携帯端末の出現・移動・消滅を許容する PCN が IoT 社会の実現に向けて親和性が高く，更なる研究開発の推進が求められている．

そのうち，第 2 章では，(課題 A) センサデータ流通基盤のネットワーク構築に関する課題の解決に取り組み，「提案 A：自律分散型 P2P 通信基盤 Waon」を提案した．これにより，不安定なネットワーク環境下においても動作可能なセンサデバイス間通信基盤を実現した．また，第 3 章では，(課題 B) センサデータ流通基盤の流通経路構築に関する課題の解決に取り組み，「提案 B：契約概念に基づくセンサデータ流通基盤 COSAP」を提案した．これにより，参加者のポリシーに基づいて流通経路を構築し動的にアプリ

ケーションを展開可能なセンサデータ流通基盤を実現した。

そこで、本章では、「課題 C：センサデータ流通基盤の利用環境構築に関する課題」の解決に取り組む。従来の PCN に基づくアプリケーション [13, 16, 17] では、利用者端末を用いてサービスを利用する際に、あらかじめ用意されたサーバに接続することでネットワークへ参加する。しかし、IoT 環境において人々を取り巻くネットワーク環境においては、通信の高速化やトラフィック増加の抑制等を目的としたエッジコンピューティング概念の適用や、センサデバイスの省電力化や通信品質の向上等を目的とした近距離無線通信技術の適用が進められており、利用者側の計算資源を有効に活用していくことが求められている。さらに、流通されるセンサデータにはパーソナルデータを多く含むことが考えられるため、プライバシーの観点からも、必ずしもインターネットやサーバに接続せず、必要に応じて近隣の機器とのみ通信を行うような機構の導入が必要になる。しかし、周辺の端末が個人所有の未知の汎用センサデバイスの場合、事前にそれらとの接続性を確立することは困難であるため、センサデータ流通基盤をローカルなアドホックネットワークのみで構築するプライベートな利用環境の構築が困難である。そのため、未知の周辺デバイスを動的に認識して接続し、ネットワークを構築する機構の実現が必要である。

このような端末間の直接通信を実現する手法として Device-to-Device (D2D) ネットワークがある [29, 30]。D2D ネットワークは基地局等のインフラを利用せずに利用者端末間で直接通信するネットワークであり、帯域効率や電力効率、通信速度等で従来の基盤より優位であることが示されている [29]。特別な端末を必要とせずにネットワークを構築しデータの共有が可能であるため、特に災害時における利用が多く想定されている [60–62]。しかし、現状普及している D2D プロトコルである Bluetooth や Wi-Fi Direct [31] のみの利用では、直接通信が可能な端末間によるコミュニケーションしかサポートされていないため、任意のネットワークの構築および連携に制約がある。

そこで、本章では事前の設定が不要な利用者端末間の D2D 通信基盤として「提案 C：ツリー型構造化 D2D 通信基盤 ICOS」を提案する。本基盤では、Wi-Fi Direct と Wi-Fi を併用することで端末間の接続関係を多段的に維持し、ツリー型のトポロジを構築する。

また、トポロジ内における各端末間の関係性に基いたルーティング法の確立により、あらかじめ他端末と情報の共有をする必要なく任意の端末とアドホックにネットワークを構築し通信が可能である。なお、本研究では、Android 端末の普及率が多くで 50% 以上であることから [63]，利用者端末として Android 端末を想定して D2D 通信基盤を構築する。

本章の構成は以下の通りである。4.1 節では、本章の概要について概説した。4.2 節では、本研究で採用する D2D プロトコルである Wi-Fi Direct および関連する研究を挙げ、それらの特徴と課題について述べる。次に、Wi-Fi Direct の仕様を明らかにするため 4.3 節で予備実験を行い、得られた結果をもとに 4.4 節で提案基盤を設計する。その後、4.5 節で提案基盤を実端末上で実装し、4.6 節における評価実験によって本基盤の実現可能性について考察する。最後に 4.7 節で本章のまとめと今後の課題について述べる。

4.2 関連研究と課題

4.2.1 Wi-Fi Direct

Wi-Fi Direct [31] は Wi-Fi Alliance によって策定された通信プロトコルであり、Android 4.0 から標準で搭載されている。Bluetooth と比較して、通信速度や電波の有効範囲の点でプロトコルよりも優れているという利点がある [30, 64, 65]。しかし、1 台のグループオーナー (GO) と、その GO に紐付けられた複数のクライアント (CL) 間のグループ内シングルホップ通信のみをサポートしているため、スター型トポロジしか構築できないという制約がある。ただし、このときに用いられる NIC は、通常の Wi-Fi 通信時に用いられる Wi-Fi 側 NIC ではなく、専用の P2P 側 NIC であるため、これらのインターフェースを適切に使い分けることで Wi-Fi と Wi-Fi Direct の併用が可能である。また、GO は周囲の端末には通常の Wi-Fi におけるアクセスポイント (AP) として認識されるため、Wi-Fi Direct 非搭載の端末でも GO への Wi-Fi 接続が可能である。なお、GO の P2P 側 NIC に割り当てられる IP アドレスは 192.168.49.1/24 で固定であり、GO に接続する CL の P2P 側 NIC (または Wi-Fi 側 NIC) の IP アドレスは DHCP によって GO か

らランダムに割り当てられる。

Wi-Fi Direct によるグループ構築には 3 つの形態がある [66]。

1. Standard : 近隣端末の発見後、どちらが GO となるか交渉して役割を決定し、その後 IP アドレスの割り当て等を行う。
2. Autonomous : 既にどちらかの端末が GO だった場合、交渉を行わずに役割を引き継ぎ、その後 IP アドレスの割り当て等を行う。
3. Persistent : 過去に両端末で接続経験がある場合、交渉を行わずに役割を引き継ぎ、その後 IP アドレスの割り当て等を行う。

グループ構築にかかる時間は Autonomous が他の形態の半分程で完了することが実端末を用いた検証により確認されている [60,66]。

4.2.2 Wi-Fi Direct を用いたマルチホップ通信基盤

Wi-Fi Direct では CL と比べ GO にかかる負担が大きいため、適切に GO となる端末を選出することは重要である。また、シングルホップ通信のみを対象としている場合は、GO の物理的な位置によって接続できる CL の数が増減するため影響が大きい。そのため、Wi-Fi Direct の性能向上を目的とした適切な GO の選出法に関する研究がこれまで多くなされてきた [67–72]。また、Wi-Fi Direct を用いたアプリケーションとして災害時における情報共有アプリケーションが提案されている [73]。このアプリケーションでは、周辺端末を Bluetooth Low Energy (BLE) によって発見して GO 情報を共有し、Wi-Fi Direct によってデータを転送している。ただし、情報共有を目的としたシングルホップのブロードキャスト通信を想定しているため、マルチホップが必要なユニキャスト通信等を効率的に行うことは困難である。

そのため、スマートフォンを対象としたマルチホップ通信が可能な D2D 通信基盤の構築手法に関する研究がなされている。文献 [60,64] では、Wi-Fi Direct のみを用いてマルチホップ通信を行う手法が提案されている。これは、各端末が常に GO として待機しておき、メッセージを転送する必要のある端末のみが CL となって転送先の GO へ接続する

ことでマルチホップ通信を実現している。しかし、転送毎に役割の変更とグループの構築が必要となるため多くの時間がかかる [66, 74] ことや、複数メッセージの同時送信が失敗する恐れがあるといった課題がある。また、文献 [61] では、Wi-Fi Direct と Bluetooth を併用した手法が提案されている。しかし、データの転送にも Bluetooth を用いているため転送速度が遅くなる他、Wi-Fi との混線が生じることが文献内で示されている。

そこで近年、前節で述べた Wi-Fi Direct の特徴に基づき、Wi-Fi Direct と Wi-Fi で異なる論理インターフェースを使いわけて併用することで、D2D 通信基盤を構築する手法が研究されている [65, 75–79]。文献 [75] では、Android OS のソースコードを改変し、各 GO が異なるサブネットを持つことでグループ間通信を実現している。また、文献 [76, 77] において、複数の GO と特定の接続関係を持つ端末がそれぞれの GO と任意に通信可能であることが示され、そのような役割を持った中継端末の存在を前提としたグループ間通信手法が提案されている [65, 78]。更に、マルチキャスト通信を効果的に利用することで同様の機能を実現する手法が文献 [79] で示されている。

4.2.3 関連研究における課題

Wi-Fi Direct を対象とした研究では、安定性や性能向上を目的として、携帯端末の OS にルート化や改変を施し、その効果を図る事例が多い。これらは、緊急時における情報共有 [60, 73] や 1 章で述べた IoT 環境における利用者端末を用いたセンサデータの共有と言ったユースケースへ適用することは困難である。また、マルチホップ通信基盤に関する研究では、転送時に多くの遅延が発生することや接続前に端末間で設定の共有が必要になるといった制約がある。

そこで本研究では、以下の課題を同時に解決する D2D 通信基盤を実現する。

- (R1)** 事前の設定共有なしに未知の汎用デバイスと接続：OS のルート化等の自身の端末への設定や、IP アドレスを周知する等の他の端末との設定の共有なしに、端末間でトポロジを構築することが困難である。
- (R2)** 任意の汎用デバイス間での低遅延なマルチホップ通信：Wi-Fi Direct ではスター

トポロジ内のシングルホップ通信しか提供していないため、任意の端末との効率的な通信を低遅延で構築することが困難である。

また、上記の要件を満たす関連研究 [65] と比較した本研究の特徴として、動的な環境への対応が挙げられる。本研究では、1 章で述べた IoT 環境へ対応可能とするため、未知の端末が動的に移動する環境を想定した設計および実装を行う。一方、文献 [65] では、最適なトポロジ構成を決定するために複数回にわたって周辺端末間で同期をとる必要があるため、端末の突然の参加および離脱に脆弱となることが考えられる。また、当該文献においては各端末間の距離は遮蔽のない非常に近接した環境において評価が行われている。しかし、実応用時には端末間の遮蔽や端末間距離の増大に伴うパケットロスにより、トポロジ構築そのものが失敗するリスクの増加も考えられる。そのため、本研究では動的な環境下における通信基盤の構築および維持を優先して実現し、その結果として構築されるトポロジの是非については考慮しない。

4.3 予備実験

4.3.1 概要

Wi-Fi と Wi-Fi Direct では用いる NIC が異なるため、それらを併用することで端末を多段的に接続していくことが可能である（詳細は 4.4 節で述べる）。しかし、P2P 側 NIC を用いて GO として機能しつつ、Wi-Fi 側 NIC で他のグループに CL として接続した場合、両 NIC に割り当てられる IP アドレスのアドレス空間が同一（192.168.49.0/24）のため、例えば以下のようなケースにおいてアプリケーション層でのメッセージの送受信が不可能である。

- 自身が CL として所属しているグループの GO へメッセージを送信する際、宛先 IP アドレスと自身の P2P 側 NIC に割り当てられている IP アドレスが等しい（192.168.49.1/24）ため、自身宛のメッセージとして処理される

そこで、本予備実験では、Wi-Fi Direct の単一グループ内における各端末間の送受信

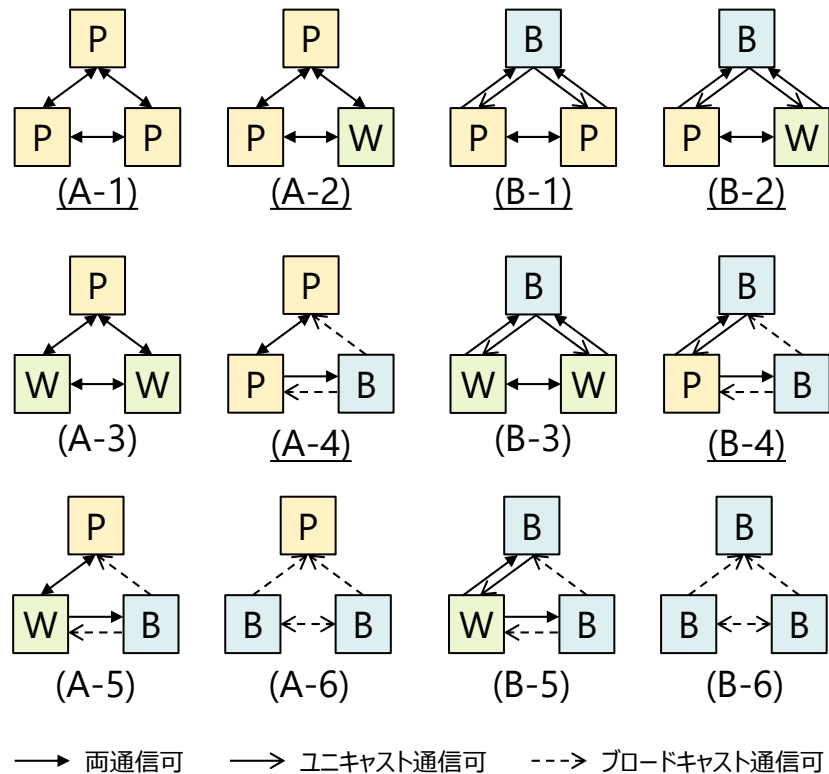


図 4.1 予備実験における実験結果

の可否について，端末の役割と両 NIC の使用状況毎に検証する．

本予備実験では，まず，ZenFone3 (Android 7.0) を 3 台用意し，それぞれに自作した予備実験用アプリケーションをインストールする．その後，任意の 1 台を GO として起動し，他の 2 台を招待して 3 台による Wi-Fi Direct グループを構築する．そのうえで，端末同士でユニキャスト通信とブロードキャスト通信によるメッセージの送受信を試行し，その可否を確認する．

試行したトポロジは，端末の役割 (GO/CL) と NIC の使用状況 (P2P 側のみ/Wi-Fi 側のみ/両方) を考慮し，その全ての組み合わせで試行が可能な 12 パターンを選択した．

4.3.2 結果と考察

図 4.1 に各トポロジにおける通信の可否をまとめた結果を示す．なお，各トポロジの上側の 1 台が GO，下側の 2 台が CL を表す．また，P は P2P 側 NIC のみを使用した端末，W は Wi-Fi 側 NIC のみを使用した端末，B は両方の NIC を使用した端末を示

す。CL は GO に対して両 NIC を通じて接続が可能のため \boxed{P} , \boxed{W} , \boxed{B} の全ての状況が考えられるが, GO については必ず P2P 側 NIC を使用するため \boxed{W} は考えない。

結果より, 片方の NIC のみを用いる \boxed{P} - \boxed{P} , \boxed{P} - \boxed{W} , \boxed{W} - \boxed{W} 間の経路では, ユニキャスト通信とブロードキャスト通信のいずれにおいても両方向通信が可能であることを確認した。一方で, 両方の NIC を用いる \boxed{B} との通信においては, NIC の使用状況だけではなく各端末の役割によっても可否が変化することが分かった。

以上の結果に基づいて提案基盤で用いるトポロジについて考察する。まず, GO-CL 間で双方向通信が不可能なトポロジ (A-6, B-6) を除外する。また, GO へ接続可能な CL の NIC は GO 側で制御可能であるが, Wi-Fi 接続中の CL が自ら新たなグループの GO となること ($\boxed{W} \rightarrow \boxed{B}$) を抑制することはできない。そのため, 双方向通信が不可能な前述のトポロジへ遷移可能な 4 トポロジ (A-3, A-5, B-3, B-5) についても除外する。以上より, 提案基盤においては図 4.1 において下線を引いた 6 つのトポロジを採用する。

4.4 ICOS

4.4.1 概要

本章では, Android 端末を対象にしたツリー型構造化 D2D 通信基盤 ICOS (Infrastructure-less Communication Platform by Off-the-shelf Smartphones) を提案する。ICOS は, 4.2.1 節で述べた Wi-Fi Direct と Wi-Fi が異なる NIC を用いる特徴に着目し, グループ内接続には Wi-Fi Direct 側の NIC, グループ間接続には Wi-Fi 側の NIC を用いることで, メッセージの転送毎に再構築が不要なツリー型トポロジを構築する。また, GO, CL, 以外の新たな役割として中継ノード (RN) を導入することでグループ間のマルチホップ通信を実現する。

本基盤は以下の機構により構成される。

(F1) トポロジ構築機構 : Wi-Fi と Wi-Fi Direct を併用してアドホックに未知の周辺端

末との接続性を確立する。このとき, 各 GO がグループ内の CL との接続インターフェースを自律的に制御することで, ある GO をルートとするツリー型のトポロジ

として構造化される。GO による制御は Wi-Fi Direct によって交換される端末情報のみを用いて行うことが可能であるため、利用者は事前に自端末への設定および他端末の情報を入力する必要がない。

(F2) マルチホップ通信機構：構造化されたトポロジ内における相手端末との関係性に基づいて経路表を構築しメッセージを転送する。このとき、トポロジ情報は (F1) において各 GO が保持しているため、利用者からの入力および事前の設定共有を行うことなく任意の端末との接続性を確立する。

本基盤では、トポロジの構築およびメッセージのルーティングは各端末が自律分散的に実施し、利用者からの入力や他端末との事前の設定共有を行う必要がない。この特徴により、マルチホップ通信が可能なツリー型のトポロジを事前の設定が不要で確立し、(R1) を達成する。また、他端末へのメッセージの送信はユニキャストで行うことが可能であり、メッセージの転送に伴うトポロジの再構築は不要である。この特徴により、状況や用途に応じた柔軟なルーティングを実現し、(R2) を達成する。

以降、4.3 節の考察に基づいて、トポロジ構築機構とマルチホップ通信機構の設計を行う。

4.4.2 トポロジ構築機構

提案基盤では、Wi-Fi Direct と Wi-Fi を併用し、GO が自身の CL との接続形態を自律的に制御することで多段的なツリー型トポロジを構築し、グループ間の接続関係を実現する。ここで、端末への役割として新たに中継端末 (RN) を導入する。RN は各グループの CL から 1 台以上選出される端末であり、GO と P2P 側 NIC による接続のみが許可される。これは、4.3 節の考察により選出した採用トポロジの 6 種において CL 側に必ず存在する **[P]** に相当し、特にトポロジ (A-4)、(B-4) においては GO から CL へのメッセージを中継する役割を担う。なお、CL については接続 NIC の制限を設けない。

トポロジの構築は以下の手順で行う。

1. D2D ネットワークを構築したい利用者が GO としてグループを構築し周辺端末を CL として招待する

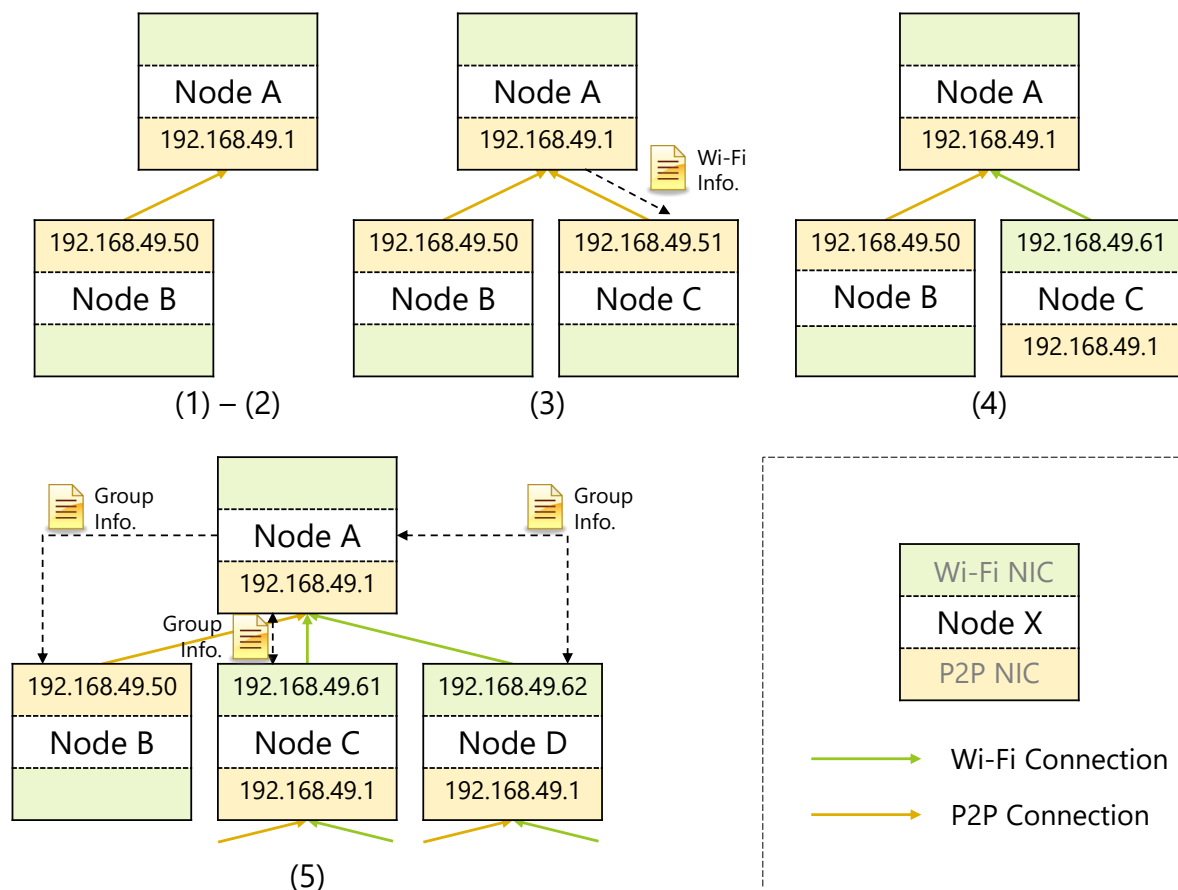


図 4.2 トポロジの構築手順

2. 1 台目に接続した CL には RN の役割を与え、P2P 接続のみを許可する
3. 2 台目以降に接続した CL には Wi-Fi 接続に必要な情報を与え、任意の接続を許可する
4. Wi-Fi 接続に切り替えた CL は新たなグループの GO となり他端末からの接続を待つ
5. GO は定期的に自身と接続する全ての端末に対して自身のグループ情報を広告する

図 4.2 にトポロジの構築手順を図示する．手順 (1), (2) では，両端末は Wi-Fi Direct の機能を用いて接続を確立する．この時，いずれかが予め GO となっておくことでグループ構築にかかる時間を短縮する．また，手順 (3) において，2 台目以降の CL の接続があった場合，その端末に対して GO への Wi-Fi 接続時に必要な情報（AP の SSID と

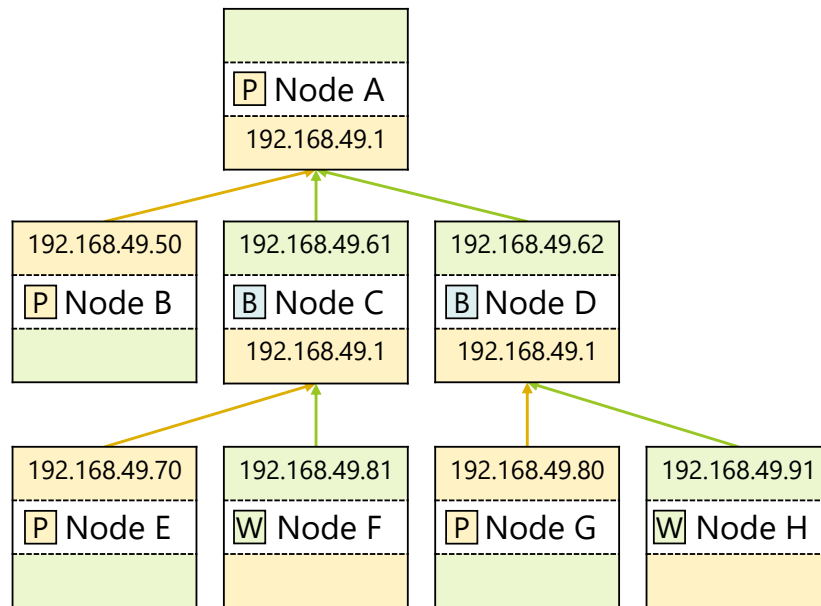


図 4.3 トポロジの構築例

Passphrase) を提供する。この情報をもとに、CL は P2P 接続を継続するか Wi-Fi 接続へ切り替えるかを決定し、Wi-Fi 接続へ切り替えた端末は手順 (4) において新たなグループの GO となって他端末からの接続を待つ。その後、手順 (5) により GO は定期的に自身のグループ情報 (GO 情報, RN 情報, CL リスト, 経路表) を周囲の端末と共有し、常に最新のトポロジ情報を全員で共有する。

図 4.3 にトポロジの構築例を示す。このとき、Node A, C, D が GO, Node B, E, G がそれらのグループの RN として機能している。その後、Node A, C, D が新たな端末の接続を受け付けるか、Node F, H が新たに GO となることによってトポロジを拡張していく。

4.4.3 マルチホップ通信機構

提案基盤では、前節の手順 (5) で共有したトポロジ情報と近隣端末の経路表をもとに、それらとの関係性に基づいて自身の経路表を更新する。ここで、4.3 節の考察により選出した採用トポロジにおける端末間の接続性を考慮し、自身の役割に応じて以下の手順で経路表を更新する。

- GO 自身のグループの端末からメッセージが届いた場合は、相手端末情報を更新し、常に RN を経由するように経路表を更新する。他グループからメッセージが届いた場合は、端末情報の更新のみを行う
- CL 自身のグループの端末からメッセージが届いた場合は、相手端末情報を更新し、常に直接接続として経路表を更新する。他グループからメッセージが届いた場合は、端末情報の更新のみを行う
- RN CL と同様

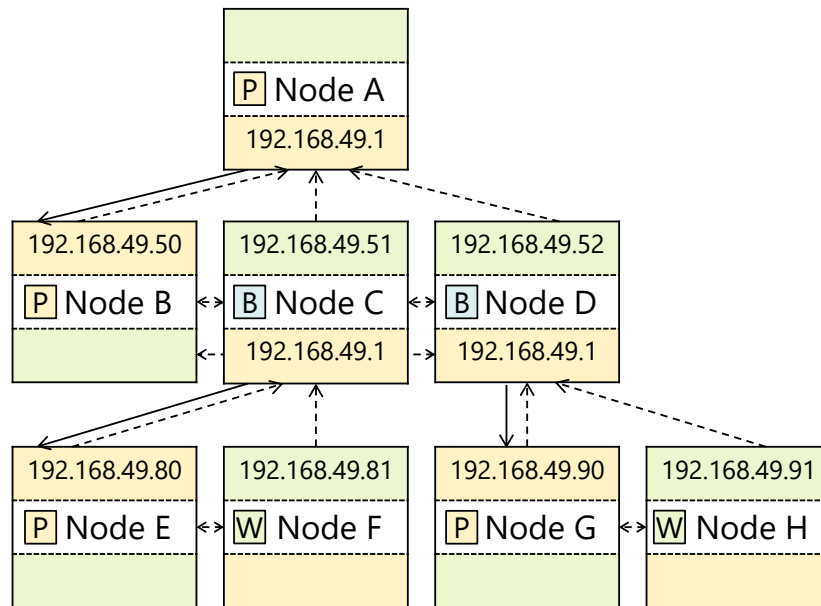
また、メッセージの送信形態は以下の規則に基いて決定する。

$$\begin{cases} \text{ユニキャスト通信} & (\text{GO} \rightarrow \text{RN}) \\ \text{ブロードキャスト通信} & (\text{CL}, \text{RN} \rightarrow \text{GO}, \text{CL}, \text{RN}) \end{cases}$$

GO が常に RN を経由してメッセージを転送するのは、CL が **B** の場合に GO 側から通信する手段がないためである（図 4.1 (A-4), (B-4) を参照）。また、この時に有効なメッセージの転送手段がユニキャスト通信のみであるため、GO からの通信では常に RN に対するユニキャスト通信を採用する。一方で、CL や RN からは任意の近隣端末に対して直接ブロードキャスト通信が可能であるため、それらからの通信では常に直接的なブロードキャスト通信を採用する。なお、ブロードキャスト通信によって全ての近隣端末が同じメッセージを受信するが、独自に設定したメッセージヘッダを参照して宛先端末 ID を確認し、自身の ID と異なる場合は破棄するよう実装する。

図 4.4 に、図 4.3 における経路表の構築例を示す。各端末間の接続形態は、図 4.4(a) に示すように、GO から自身のグループ内の端末への送信時のみ RN へのユニキャスト通信であり、それ以外はブロードキャスト通信を用いた直接通信となっている。なお、実線がユニキャスト通信、点線がブロードキャスト通信を表している。

このときの Node C の経路表を図 4.4(b) に示す。Node A, B, D については自身が CL として所属するグループの端末のため、ブロードキャスト通信による直接通信が適用される。また、Node E, F については自身が GO として所属するグループの端末のため、RN である Node E をユニキャスト通信で経由する経路が適用される。更に、Node G, H とは直接的な接続関係はないが、Node D と経路表を共有した際に獲得可能な経路情報であ



(a) 通信経路

宛先	ホップ先	(ホップ数)	(関係)	(送信形態)
Node A	-	0	CL→GO	Broadcast
Node B	-	0	CL→RN	Broadcast
Node D	-	0	CL→CL	Broadcast
Node E	Node E	0	GO→RN	Unicast
Node F	Node E	1	GO→RN	Unicast
Node G	Node D	1	CL→CL	Broadcast
Node H	Node D	2	CL→CL	Broadcast

(b) Node C の経路表

図 4.4 経路表の構築例

るため、ホップ先を Node D として登録を行う。なお、ホップ数は複数端末と経路表を交換した際に生じる経路の衝突を防ぐためのものであり、常にホップ数が最小の経路を採用する。トポロジの構造上、最短経路は一意に定まるため、各端末の持つ経路表は端末の移動性を考慮しなければ一定時間経過後に必ず収束する。また、端末間の関係性や送信形態はメッセージの送信時に参照される項目であり、メッセージで共有する経路表の

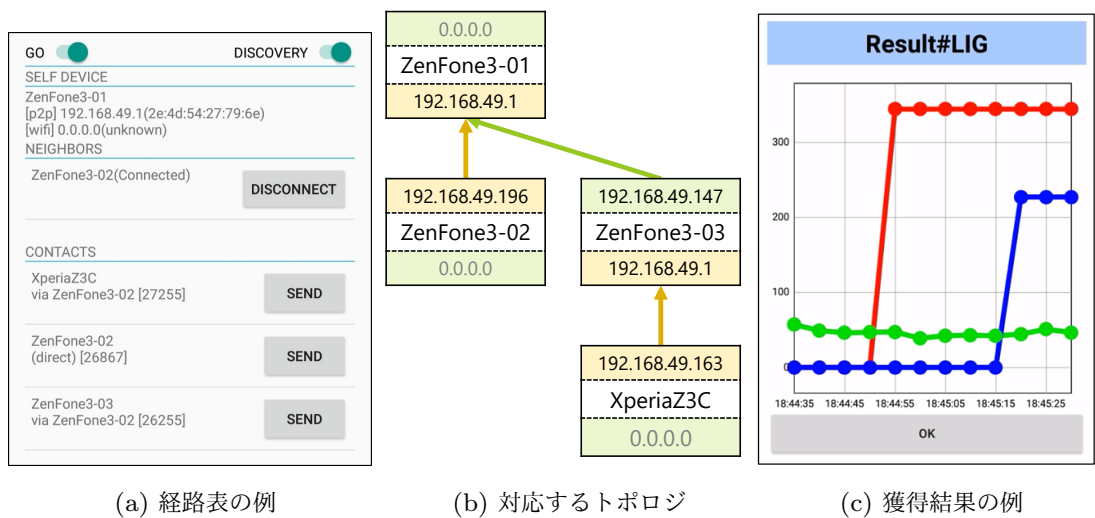


図 4.5 ICOS に基づくセンサデータ流通システム

情報には含めない。

4.5 ICOS に基づくセンサデータ流通システム

4.5.1 概要

本章では、ICOS の応用例の一つとして、端末間のセンサデータ流通システムを実装する。本システムでは、4.4.2 節で述べたトポロジ構築機構により、ICOS を起動中の周辺端末を自動的に検出し、それらの端末のみで構成されるプライベートなネットワークをアドホックに構築する。その後、4.4.3 節で述べたマルチホップ通信機構により、ネットワークに参加中の任意の端末から指定のセンサデータをリアルタイムに獲得して表示する。

図 4.5 に実装したセンサデータ流通システムを示す。図 4.5(a) は、図 4.5(b) に示すトポロジ構成における ZenFone3-01 の UI である。UI には、上段に自身の端末に関する情報、中段に Wi-Fi Direct における近隣の端末情報、下段に同一ネットワークに参加中の端末情報が表示される。図より、自身の端末の NIC の使用状況が正しく反映され、また、各端末への経路表が正しく共有されていることが確認できる。また、図 4.5(c) は、周辺端末から照度センサの値を獲得している様子を示している。図のように、本システムを

表 4.1 使用した Android 端末

No.	製品名	端末名	Version
1	ZenFone3	ZenFone3-01	7.0
2	ZenFone3	ZenFone3-02	7.0
3	ZenFone3	ZenFone3-03	7.0
4	Xperia Z3 Compact	XperiaZ3C	6.0.1
5	GALAXY S4	SC-04E-01	5.0.1
6	GALAXY S4	SC-04E-02	5.0.1
7	Ascend G620S	HUAWEI-01	4.4.4

利用することで、各周辺端末について、自端末と通信が可能になった時点からセンサデータの獲得がリアルタイムに行われる。

本システムの実装および動作検証に利用した Android 端末の一覧を表 4.1 に示す。また、実装環境を以下に示す。

- **IDE** : Android Studio 3.0.1
- **compiled SDK** : Version 25 (Android 7.1)
- **minimum SDK** : Version 18 (Android 4.3)

4.5.2 トポロジ構築機構の実装

図 4.6 に、4.4.2 節で述べたトポロジ構築機構のシーケンス図を示す。以下に、図における各端末の挙動を列挙する。

1. 各 Node は ICOS を利用する周辺端末を発見するため「周辺探索」状態へ移行する
2. Node A が「GO になる」を実行し、端末間ネットワークの構築を開始する
3. Node B, Node C が Node A を発見（「GO 発見」）し、ICOS 利用中の GO であることを認証する（「GO 認証」）

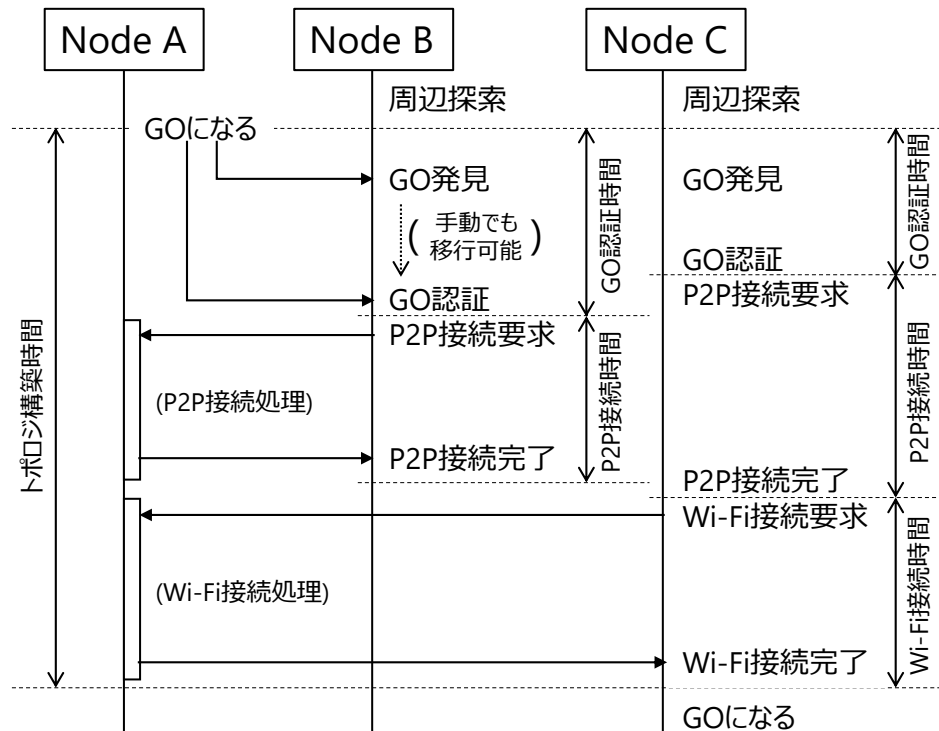


図 4.6 トポロジ構築機構のシーケンス図

4. Node B, Node C が Node A に対して Wi-Fi Direct を用いて P2P 接続を試行する（「P2P 接続要求」）
5. Node A が要求のあった端末との P2P 接続を確立する（「P2P 接続完了」）
6. Node A が 2 台目以降に接続を確立した Node C に対して Wi-Fi 接続情報を付与する
7. Node C が Node A に対して P2P 接続を切断し Wi-Fi 接続を試行する（「Wi-Fi 接続要求」）
8. Node A が要求のあった端末との Wi-Fi 接続を確立する（「Wi-Fi 接続完了」）
9. Node C が新たなグループの GO となり他端末からの接続要求を待つ（「GO になる」）

また、各挙動における具体的な処理は以下の通り。ただし、Bluetooth を用いたメッセージの交換は Android 5.0 以上の端末のみで行う。

周辺探索 : Wi-Fi Direct における Peer および Local Service の探索、および Bluetooth における Advertise メッセージの Scan を開始する。しかし、特に Wi-Fi Direct

における探索の成功率が低いため、本システムでは 10 秒毎に探索を再試行する。
ただし、P2P 接続要求中および Wi-Fi 接続要求中は再試行を行わない。

G0 になる : Wi-Fi Direct におけるグループの作成および Local Service の登録, および Bluetooth における Advertise メッセージの発信を行う。この時, Local Service のサービス名および Advertise メッセージのペイロードには ICOS 特有の文字列を含めることで, 周辺端末に ICOS 利用中の端末であることを広告する。

G0 発見 : Wi-Fi Direct における Peer 情報を獲得する。この時, 獲得した Peer 情報のうち G0 の端末のみを保持しておく。この時点では, 発見した端末が ICOS 利用中の端末かどうかの判定は行うことができない。

G0 認証 : Wi-Fi Direct における Local Service または Bluetooth における Advertise メッセージを獲得する。この時, Local Service のサービス名または Advertise メッセージのペイロードに ICOS 特有の文字列が含まれているかどうか判定し, 含まれている情報の送信元端末情報のみを保持する。その後, 「G0 発見」で得た端末情報と比較することで, ICOS 利用中の G0 端末であることを認証する。

P2P 接続要求 : Wi-Fi Direct における接続要求を発見した G0 に対して行う。しかし, Wi-Fi Direct における接続要求は失敗することもあるため, 本システムでは 10~20 秒毎に接続要求を再試行する。再接続要求までの時間は, 接続要求中の端末の状態に応じて決定する。具体的には, 接続要求後 10 秒経過時点で自端末の状態が `WifiP2pDevice.INVITED` であれば再試行を実施し, `WifiP2pDevice.CONNECTED` であれば待ち時間を 10 秒延長する。

P2P 接続完了 : G0 から受信したグループ情報を保持する。この時, 自身が RN ではなく CL としてグループ情報に登録されている場合は, 引き続き「Wi-Fi 接続要求」に遷移する。

Wi-Fi 接続要求 : Wi-Fi Direct におけるグループから離脱し, Wi-Fi による接続を発見した G0 に対して行う。なお, 「P2P 接続要求」と同様に Wi-Fi 接続要求は失敗することもあるため, 本システムでは 10 秒毎に接続要求を再試行する。

Wi-Fi 接続完了 : 即座に「G0 になる」を実施する。

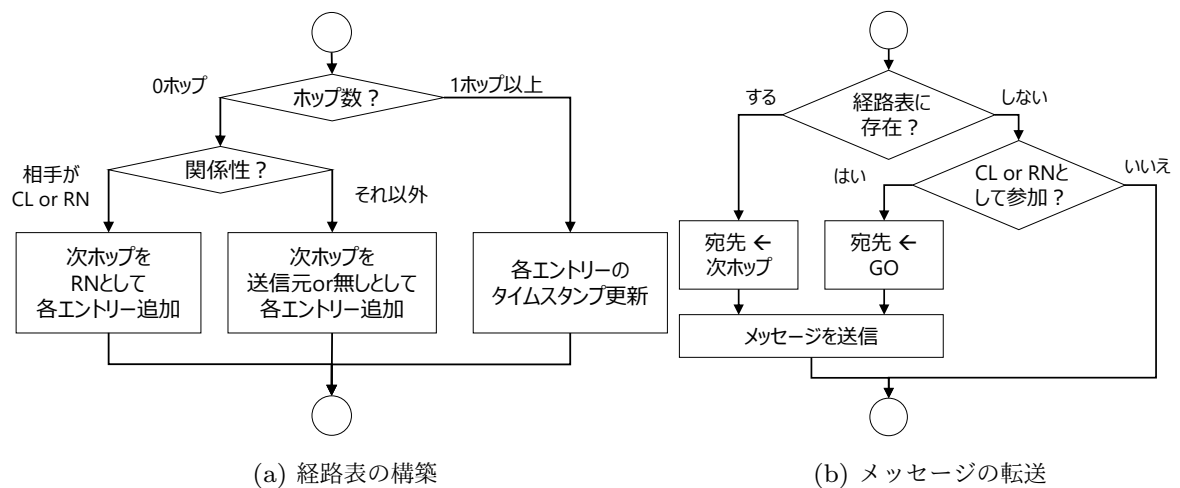


図 4.7 マルチホップ通信機構のフローチャート

4.5.3 マルチホップ通信機構の実装

マルチホップ通信機構では経路表の構築およびメッセージの転送を行う。図 4.7 にそれぞれの機能のフローチャートを示す。

経路表の構築では、各端末がメッセージを受信する毎に図 4.7(a) に示すフローを実行する。具体的には、メッセージを直接受信した場合は、送信元端末およびペイロードに含まれる経路表の情報を新たなエントリーとして追加する。この時、自身が GO かつ送信元端末が CL または RN である場合は次ホップを RN、それ以外であれば次ホップを送信元端末または直接通信として上書きする。また、メッセージを 1 台以上の中継を経て受信した場合は新たなエントリーの追加は行わず、対象エントリーのタイムスタンプの更新のみを行う。タイムスタンプは端末所有者の移動等によって生じる端末のネットワークからの離脱を判断するために用いる。本実装では、10 秒以上更新のないエントリーに対して定期的に HELLO メッセージを送信して生存確認を行い、60 秒以上更新のないエントリーに対してはネットワークから離脱したと判断し経路表から削除する。

メッセージの転送では、各端末がメッセージを送信する際に図 4.7(b) に示すフローを実行し転送先の端末を決定する。具体的には、送信先の端末情報が経路表に存在する場合は転送先としてエントリーに記載の次ホップを指定し送信する。また、送信先の端末情報が経路表に存在しない場合でも、自身が CL または RN としてネットワークに参加し

ている場合は転送先として GO を指定してメッセージを送信する。それ以外の場合はメッセージの送信は行わない。

4.5.4 センサデータ流通機構の実装

本システムでは、ICOS の機能によって構築された端末間のプライベートネットワーク内において自由なセンサデータの流通機能を提供する。この時、端末所有者はセンサデータの提供者であると同時に、センサデータの利用者としても振る舞う。

センサデータを提供する際は、端末所有者は自身が所有するスマートフォンに内蔵している各センサデバイスについて提供の可否を決定する。その後、システムが端末所有者が許可したセンサデバイスの種類に応じて端末名の末尾に特定のタグを付与し、以降その端末名でメッセージの送受信を行う。これにより、他端末の経路表に登録されるエントリーには、端末名の他にその端末が提供を許可しているセンサデバイスの種類が記録されることになる。なお、本システムで想定している内臓センサデバイスは、位置センサ、気圧センサ、照度センサ、気温センサ、および湿度センサの 5 種類である。

また、センサデータを獲得し利用する際には、端末所有者は自身の管理する経路表から特定のセンサデバイスのタグを含む端末を検索し、一定時間ごとに対象端末に対してセンサデータのリクエストメッセージを送信する。その後、獲得したセンサデータを可視化して表示する。

4.6 評価

4.6.1 センサデータ流通システムの動作検証

概要

本実験では、ICOS の機能によって他端末との事前の設定共有を必要とせずにアドホックに端末間ネットワークを構築し、任意の周辺端末とリアルタイム通信を行うことを、以降に述べる 4 つのシナリオにおいてセンサデータ流通システムにおけるセンサデータの獲得を観測することで検証する。使用した端末は表 4.1 における端末 1-4 の 4 台であり、

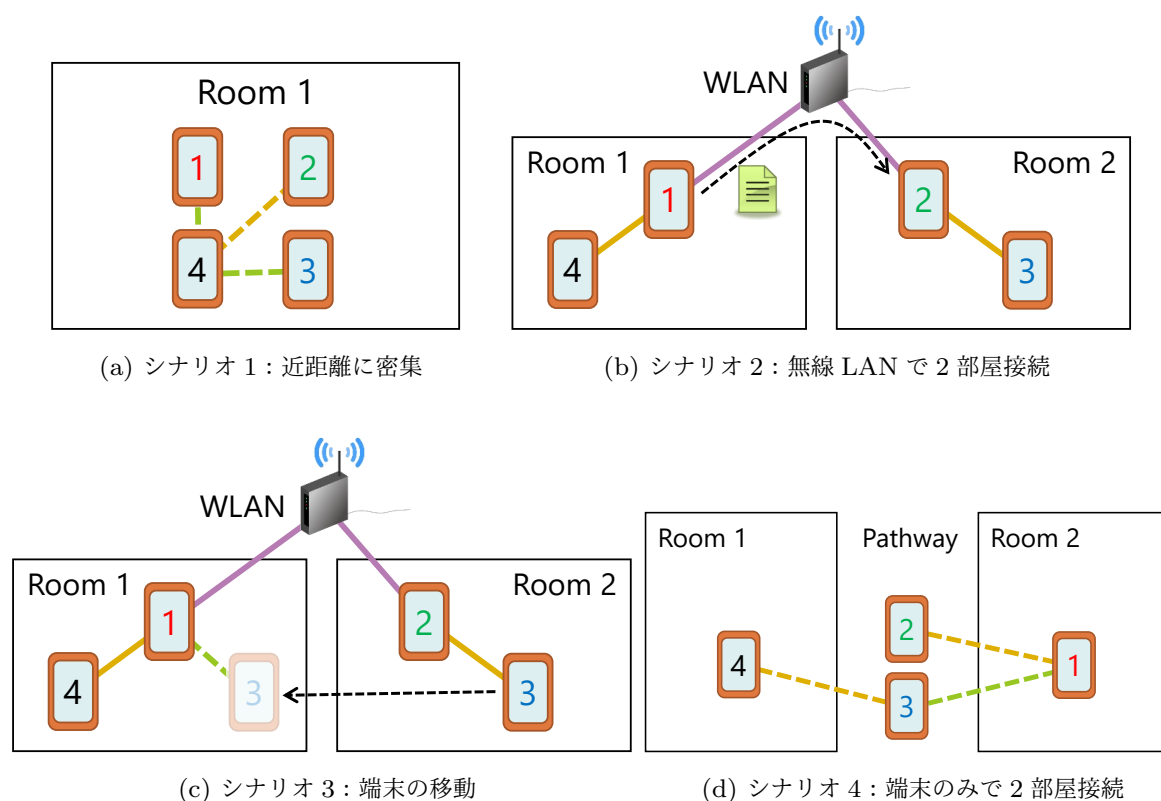
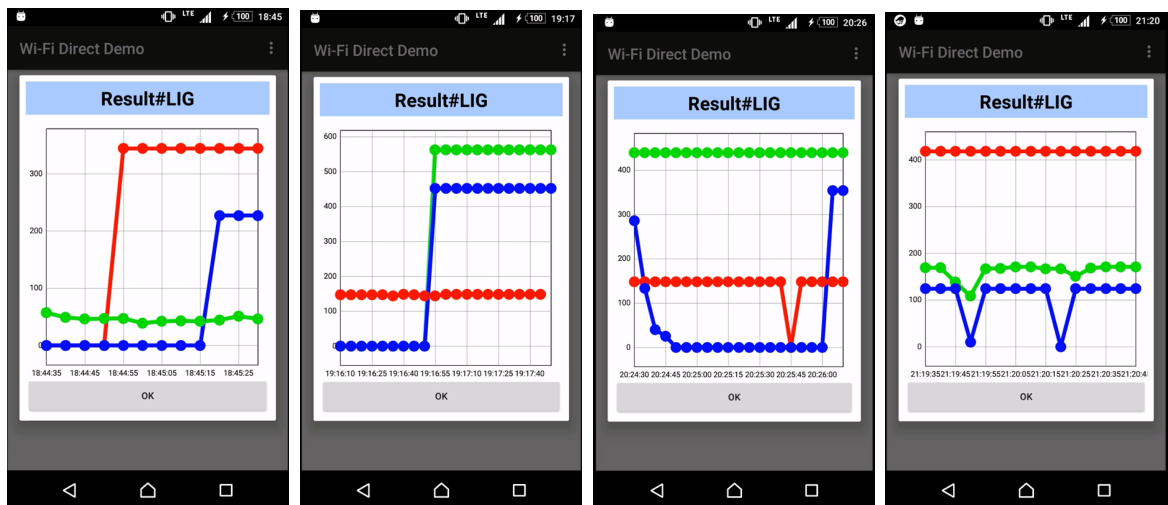


図 4.8 動作検証シナリオ

本実装システムを事前にインストールしたこと以外は事前の設定は行っていない。また、各シナリオの共通事項として、端末 1-3 を提供者端末として、端末 4 を利用者端末として事前に照度センサを登録しておく。また、同一空間内における端末の端末間距離は 10 cm とした。なお、トポロジ構築機構およびマルチホップ通信機構の定性的な性能評価については後の実験において検証する。

図 4.8 に本実験で実施したシナリオの概要を示す。なお、黄色の線が P2P 接続，緑色の線が Wi-Fi 接続，紫色の線が無線 LAN による接続を表している。また、実線は実験開始時に確立済みの接続，点線は実験開始時に未確立の接続を表す。

シナリオ 1 では、全端末を近距離に配置し、「周辺探索」状態にした後に端末 4 が「GO になる」を実行することでセンサデータの流通を開始する。そして、周辺端末同士が自律的にネットワークを構築しセンサデータの流通を開始するかを確認する。シナリオ 2 では、端末 1, 4 と端末 2, 3 を異なる部屋に配置し、端末 1 と端末 2 を共通の無線 LAN に接続しておく、その後、各部屋においてシナリオ 1 と同様に端末間ネットワークを構築し



(a) シナリオ 1 の結果 (b) シナリオ 2 の結果 (c) シナリオ 3 の結果 (d) シナリオ 4 の結果

図 4.9 動作検証結果

ておき，端末 1 から端末 2 に対して HELLO メッセージを送信して無線 LAN 経由での接続性を確立させる．そして，端末 4 が遠隔地との接続を認識しセンサデータの獲得を開始するかを確認する．なお，2 部屋間で異なる部屋の端末を互いに発見できないことを事前に確認している．シナリオ 3 では，シナリオ 2 と同様に異なる 2 部屋の端末を無線 LAN によって接続しセンサデータを流通している状態から，端末 3 を異なる部屋へ移動させる．そして，端末 3 が移動先の部屋でネットワークに再接続しセンサデータの流通が再開されるかを確認する．シナリオ 4 では，異なる 2 部屋と中継地点である廊下に端末を配置し，端末 1 が「GO になる」ことでセンサデータの流通を開始する．そして，直接接続が不可能な距離にいる端末同士を LAN 等のインフラを用いずに接続しセンサデータの流通が可能かを確認する．なお，各部屋から廊下の端末を互いに発見できることを事前に確認している．

実験結果

図 4.9 に実験結果を示す．なお，図中のグラフの色は図 4.8 における端末番号の文字色と対応している．

シナリオ 1 では，端末 4 が自律的に周辺端末の端末 1-3 と順次接続関係を確認し，センサデータの流通を開始したことを確認した．このとき，端末 2 との接続がまず行われ，

その後時間を置いて端末 1, 3 と接続している。これは、端末 4 と初めに接続した端末は P2P 接続しか行わないのに対し、2 台目以降に接続した端末は P2P 接続後に Wi-Fi 接続に切り替える処理を行う必要があることに起因する。また、端末 1 と端末 3 でデータの獲得開始時刻に差があることについては、端末 3 が P2P 接続または Wi-Fi 接続に失敗し再接続が必要になったためである。これらの、端末間でのトポロジの構築に要する時間の評価については 4.6.2 節において別途実施する。

シナリオ 2 では、始めは端末 1 のみからセンサデータを獲得していた状態から、端末 1, 2 間で接続が確立されたことを端末 4 が自動的に検出し、新たに端末 2, 3 からセンサデータの獲得を開始したことを確認した。また、これにより、ICOS が単一のツリー型トポロジ内の通信だけでなく、複数のツリー型トポロジ間での通信を行えることを確認した。

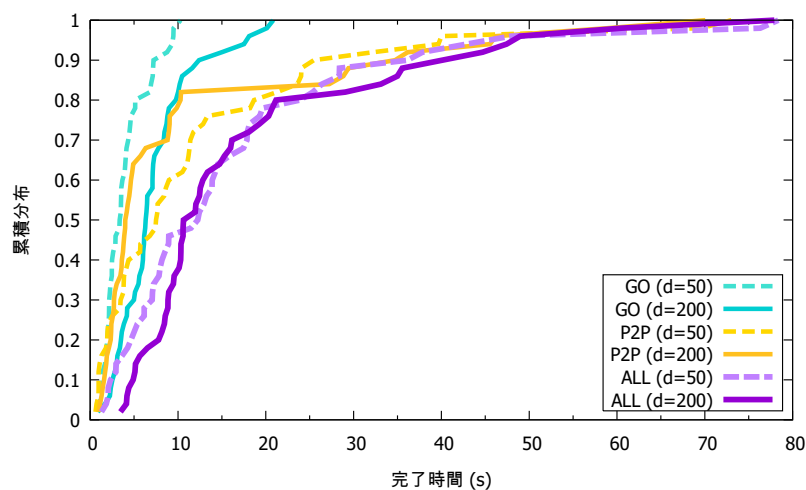
シナリオ 3 では、3 台の端末からセンサデータを獲得していた状態から、端末 3 が移動を開始するとネットワークから離脱しセンサデータの獲得が中断されたことを確認した。その後、端末 3 は移動先の部屋で新たに端末 1 の CL としてネットワークに再接続し、センサデータの流通が再開された。これにより、移動中にネットワークから離脱した端末が自律的に移動先の端末と再接続しデータ提供を再開したことを開始した。また、図 4.9(c) に示すように、端末 1 からのメッセージ受信に失敗したためセンサ値が 0 となった区間を確認した。これについては、ICOS の通信の安定性について 4.6.3 節において別途検証する。

シナリオ 4 では、シナリオ 1 と同様に端末間で自律的にネットワークを構築し、直接通信できない位置の端末 1 からセンサデータを確認できたことを確認した。

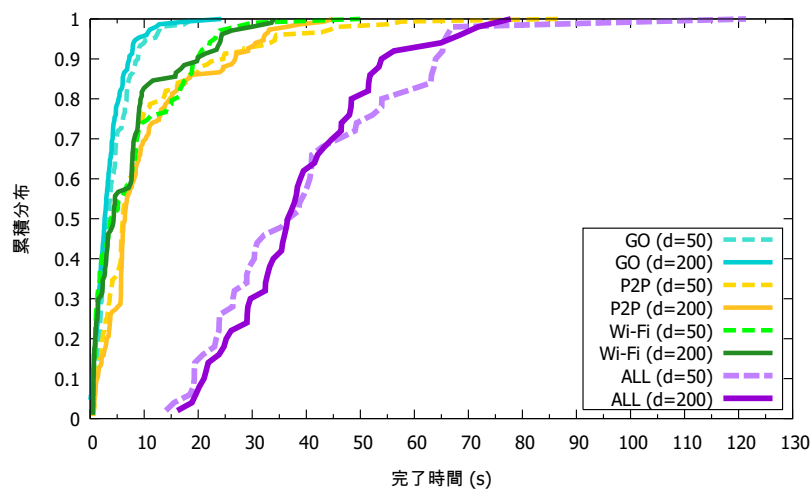
4.6.2 トポロジ構築機構の性能評価

概要

本実験では、静止した端末間でトポロジを構築するまでに要する時間について検証する。使用した端末は表 4.1 における端末 1-4 の 4 台である。まず、端末間距離を 50 cm または 200 cm となるように格子状に端末を n 台配置し、全端末を「周辺探索」状態に



(a) $n = 2$ の結果



(b) $n = 4$ の結果

図 4.10 トポロジ構築機構の性能評価実験結果

した後に端末 4 が「GO になる」を実行することでトポロジの構築を開始する．このトポロジの構築を 50 回試行し，GO が他の全 CL と通信可能になるまでのトポロジ構築時間 (ALL)，端末 4 が GO になってから周辺端末が GO を発見し認証するまでの GO 認証時間 (GO)，周辺端末が GO に P2P 接続を依頼し完了するまでの P2P 接続時間 ($P2P$)，そして CL が P2P 接続を解消し Wi-Fi 接続を確立するまでに要する Wi-Fi 接続時間 ($Wi-Fi$) をそれぞれ計測した．なお，各時間の計測区間の詳細は図 4.6 に示している．

実験結果

図 4.10 に実験結果を示す．図 4.10(a) は $n = 2$ の際の結果であるため Wi-Fi 接続時間は計測していない．各標本数は 50 である．また，図 4.10(b) は $n = 4$ の際の結果であり，標本数は *ALL* が 50，*P2P* は各試行で 3 台の CL が接続を試みるので 150，*Wi-Fi* は各試行で 2 台の CL が接続を試みるが何度か再接続が発生したため $d = 50$ で 103， $d = 200$ で 104 となった．

図より，今回のような小規模な環境においては距離や台数によって大きな差がなく端末間ネットワークを構築したことが分かる．具体的には，全試行のうち 9 割において，GO 認証時間が 10 秒，P2P 接続時間が 30 秒，Wi-Fi 接続時間が 20 秒以内で接続を完了した．すなわち，ある端末が周辺の探索を開始してから 40 秒でネットワークへの接続を完了できた．なお，比較的分散が大きかったのは *P2P* であり，その理由として，Wi-Fi Direct における成功率が低いことが原因として挙げられる．本実装においては P2P 接続を試行してから一定時間が経過すると，P2P 接続に失敗したと判断して再試行を行う．このことは，特に $n = 2$ における P2P 接続時間が，徐々に階段状に累積していく様子にあらわれている．そのため，Wi-Fi Direct そのものの安定性の向上に加え，P2P 接続の失敗を即時的に検出することがトポロジ構築時間全体を短縮において効果的といえる．

4.6.3 マルチホップ通信機構の性能評価

概要

本実験では，構築済みの端末間ネットワーク内において，任意の端末間で遅延なくマルチホップ通信を行うかを確認する．図 4.11 に本実験で用いるトポロジを示す．このうち，図 4.11(a) におけるトポロジ A は深さ優先のトポロジであり，主にトポロジにおける縦方向のメッセージ交換の可否について検証する．また，図 4.11(b) におけるトポロジ B は幅優先のトポロジであり，主にトポロジにおける横方向のメッセージ交換の可否について検証する．なお，使用端末は，トポロジ A では表 4.1 における端末 1–7，トポロジ B では端末 1–6 を用いる．

本実験では，各端末は構築トポロジに対応するよう 30 cm の間隔をあけて配置する．

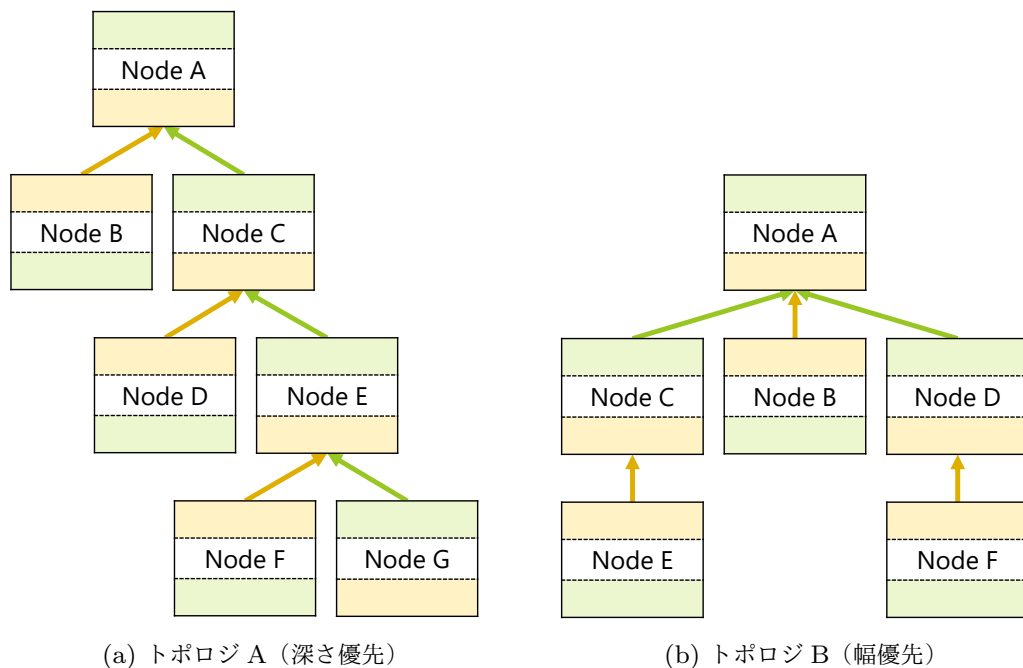


図 4.11 実験トポロジ (マルチホップ通信機構の性能評価)

各端末には他端末の情報やトポロジ情報は事前知識として与えず，前節で述べたようにルートノードとなる GO の選出及び周辺端末における接続先 GO の選択のみ手動で操作する．実験中，各端末の移動は考えない．

実験手順は以下の通り．

1. 任意に選択した端末を GO とし，起点となるグループを生成する．
2. GO に対して任意に選択した周辺端末から Wi-Fi Direct による接続を試みる．
3. GO からの要請によって新たな GO となった端末に対して，手順 (2) を繰り返す．
4. 手順 (3) を繰り返し，目的のトポロジを構築する．
5. 各端末の経路表を同期する．
6. 全ての端末間でメッセージを交換し，成功の可否と遅延について測定する．

なお，次節以降の実験結果及び考察では，図 4.11 における端末のアルファベットと表 4.1 における端末の番号を順に対応させて行った実験結果について述べる．また，本実験では 4.4.2 節における手順 (5) における定期的なメッセージ交換機能を無効にし，端末間での経路表の同期は手動でメッセージを交換させることによって行った．

表 4.2 端末間通信の実験結果 (RTT (ms) / 失敗回数)

送信先 送信元	A	B	C	D	E	F	G
A		114/0	126/0	260/1	439/1	661/1	758/5
B	55/0		146/1	388/1	593/5	758/3	925/4
C	130/0	182/1		187/0	225/0	400/2	535/1
D	441/4	356/3	33/0		74/0	309/0	511/2
E	575/0	589/4	224/1	208/0		127/0	210/0
F	873/0	804/6	331/3	357/0	90/0		148/0
G	712/3	918/11	503/0	461/0	165/0	112/0	

(a) トポロジ A

送信先 送信元	A	B	C	D	E	F
A		127/0	308/0	276/0	298/0	565/0
B	28/0		302/2	241/0	338/0	303/0
C	267/0	325/0		345/2	51/0	550/0
D	203/2	250/2	355/0		345/2	157/0
E	317/0	426/2	58/0	424/1		761/0
F	441/1	458/2	507/0	87/0	573/3	

(b) トポロジ B

実験結果

表 4.2 に前節の実験手順 (6) における端末間通信の結果を示す。本実験では、各端末間で UDP によりメッセージを 20 回ずつ交換し、かかった RTT の平均と通信が失敗した回数を測定した。表より、端末性能またはノード間の関係性によって結果にばらつきが生じたことが分かる。

具体的には、トポロジ A における Node C \leftrightarrow Node D, Node E \leftrightarrow Node F, トポロジ B における Node A \leftrightarrow Node B のように、同じ経路でも送受信端末が逆になった場合と比較

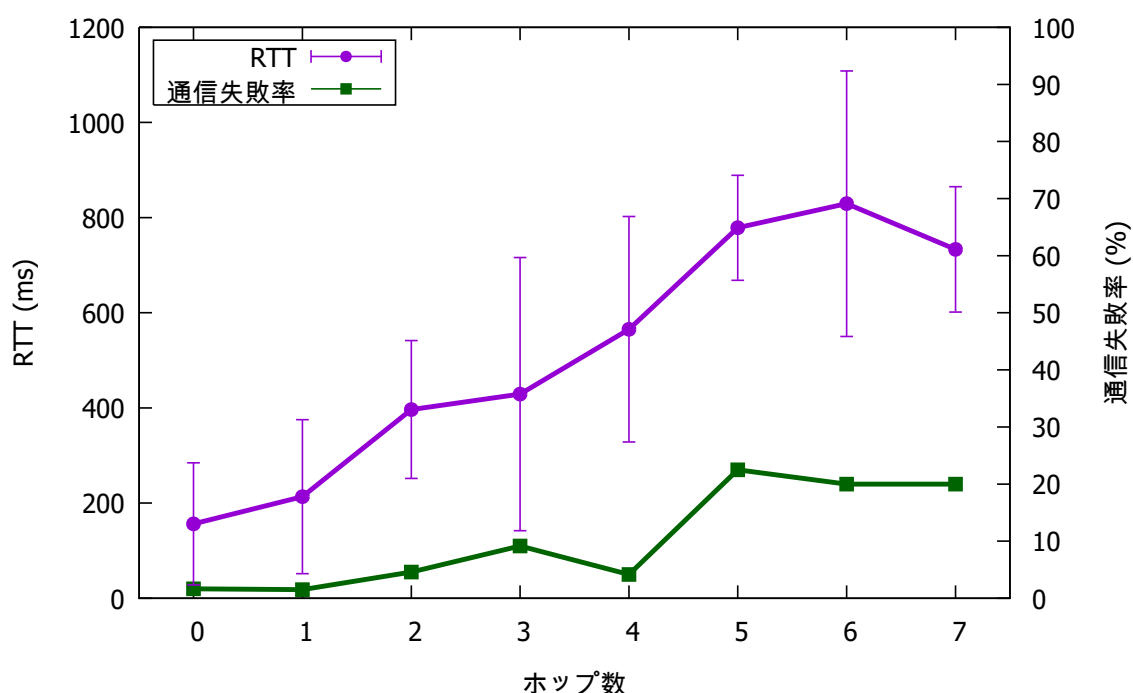


図 4.12 ホップ数毎の端末間通信の実験結果

すると、RTT が大きく異なる結果となった．これは $GO \boxed{P} \boxed{B} \leftrightarrow CL \boxed{P}$ において発生しており，異なる端末を用いた検証でも同様の結果が得られたため，Wi-Fi Direct における役割または使用インターフェースによって処理性能に差が出ることが考えられる．また，直接接続された端末間における通信に着目すると， $GO \leftrightarrow CL$ 通信よりも $CL \leftrightarrow CL$ 通信の方が低速になった．特に，トポロジ B における $CL \leftrightarrow CL$ 通信では計 6 度送受信に失敗している．グループの台数の増加に伴ってパケットロス率が増加することが文献 [80] でも示唆されており，CL 数が通信の安定性に与える影響は今後端末数を増やして詳細に検証する必要がある．

図 4.12 に各トポロジにおける結果を集約し，端末間のホップ数毎にまとめなおした RTT と標準偏差，および通信失敗率を示す．前述したように同じホップ数の通信でも RTT に大きなばらつきがあるが，概ね 1 ホップあたり 100 ms ずつ増加する傾向が読み取れる．また，ホップ数の増加とともに著しく通信失敗率が上昇した．

4.6.4 考察

4.6.1 節の実験結果より，一般の Android 端末へ ICOS をインストールするだけでマルチホップ D2D 通信環境が構築可能であることを確認した．ICOS では Wi-Fi と Wi-Fi Direct の標準機能のみを用いているため，OS の改変やそれに伴う端末のルート化等を施す必要がない．また，トポロジの構築時およびルーティング時に必要な近隣端末情報を事前に与える必要がなく，各 GO による自律的なグループの管理と端末間の関係性に基づいた経路表の構築によって動的に環境を構築することができた．また，単一の端末間ネットワーク内の通信だけではなく，複数のネットワークを LAN によって接続した場合や，端末の移動に伴ってネットワークが再構築された場合でも通信が行われることを確認した．以上より，4.2.3 節で述べた要件を全て満たすマルチホップ D2D 通信基盤を実現した．

4.6.2 節の実験では，ICOS ネットワークへの端末の参加が 40 秒で概ね完了することを確認した．また，4.6.3 節の実験では，通信遅延は 1 ホップあたり 0.1 秒程度増加し，状況によってはパケットロス率が 20% を超える場合があることを確認した．これらから，すれちがい通信等の高モビリティ環境におけるユースケースには ICOS は不向きであるといえる．ただし，通信インフラが不安定となり D2D 通信の必要性が高まる災害環境下におけるユースケース等においては，ICOS は有用な通信インフラとなる可能性がある．ICOS では，未知の周辺端末と即時的にネットワークを構築し，任意の端末とユニキャスト通信が可能である．そのため，避難所等の単位毎にトポロジを構築し，様々な災害情報のブロードキャストによる広告や，通信相手を指定してのメッセージのやりとりといった柔軟な情報共有を実現することができる．また，その他にも，物理的な地理範囲を限定した局所的な広告システムへの応用が考えられる．これは，観光地や飲食店といった特定の場所に移動することがトリガーとなって局所的な端末間ネットワークへ参加し，そのネットワーク限定で情報の共有や広告の配信といったサービスをうけるといったシステムである．これらのシステムへの応用により，利用者間でのデータ流通をより促進させ，それらに基いて提供されるサービスの品質・利便性の向上に寄与する．

最後に，実装および実験を通して判明した検討事項について述べる．

GO の消費電力 : 端末を GO として起動すると AP として機能し周辺端末からの接続を待機するが、この状態を維持することによる明らかな消費電力の増加を確認した。本研究で想定するユースケースでは利用者によるスマートフォン同士で情報を共有するため、特定の端末のみに大きく資源の負担を強いるべきではない。そのため GO となる端末へ何らかのインセンティブを与える機構や、各端末の地理的な位置情報等をもとにして最小の GO の台数で済むようトポロジを最適化する機構等の導入が必要になる。

P2P 接続時の認証画面 : Wi-Fi Direct の仕様では、GO へ CL として P2P 接続を試みると、端末間で過去に接続履歴が残っていない場合に認証画面が表示されるようになっている。これによって D2D ネットワークへの参加時に必ず端末の所有者とのインタラクションが必要となるが、提案基盤におけるトポロジでは 1 台以上 GO と P2P 接続した RN が必要であるためこのインタラクションを回避することができない。そのため、このインタラクションを前提としたアプリケーションの設計開発が必要になる。

4.7 おわりに

本章では、「課題 C：センサデータ流通基盤の利用環境構築に関する課題」に対して「提案 C：ツリー型構造化 D2D 通信基盤 ICOS」を提案した。本 D2D 通信基盤では、各端末は専用のアプリケーションをインストールするだけで、近隣の端末間で D2D ネットワークを構築し情報の共有を行うことができる。ネットワークの構築には近隣端末情報等の事前知識が不要であるため、アドホックなネットワークを即時的に構築することが可能であり、従来研究では困難であった効率的なマルチホップ通信により任意の端末間で通信が可能である。また、実端末を用いた提案基盤の実装および性能評価によって上記の特性を確認し、ホップ数や端末性能が与える通信遅延や安定性について考察した。

今後の予定として、トポロジ構築の最適化機構を検討する。具体的には、各端末の移動性や物理位置、残資源量等を考慮して RN を選出し、他の CL についても適切な \boxed{P} , \boxed{W} ,

☐B を選択可能とした上で，新たな端末が自動的に最適な GO へ接続を試行する機構を検討する．

第 5 章 結論

5.1 本研究の目的と課題

センサデバイスの小型化や高機能化に伴って IoT 環境の社会実装が進められ、センサデータの利活用ならびにセンサデータの流通を支えるプラットフォームの整備に産業界・学術界双方から注目が集まっている。本研究では、そのうちスマートフォン等に内蔵されている汎用的なセンサデバイスの利活用モデルの構築に着目した。従来のセンサ型アプリケーションおよびセンサデータ流通基盤では、システムの構築のためにあらかじめ設置した専用のセンサデバイスを対象としている。そこで本研究では、汎用センサデバイスから得られる様々なセンサデータを、時間・空間・用途・相手に依らずに自由に獲得し共有可能な利用者指向のセンサデータ流通基盤の実現を目的とし、この実現にあたっての技術的な課題を以下のように設定した。

(課題 A) センサデータ流通基盤のネットワーク構築に関する課題：アプリケーション毎にネットワークを構築しデータを収集する従来の垂直統合型のサービス構成モデルでは、汎用センサデータの利活用への対応が困難である。それは、従来の垂直統合型のサービス構成モデルでは、サービス独自のネットワークへセンサデバイスが参加するという能動的な行為を前提としていることに起因する。そのため、センサデバイスとサービスが相互に接続し協調する水平分散型のサービス構成モデルを実現可能なセンサデータ流通基盤を構築する必要がある。

(課題 B) センサデータ流通基盤の流通経路構築に関する課題：サーバやクラウドにセンサデータを集約し利用する従来のデータ利用モデルでは、参加者間の関係性やデータの利用用途・データ所有者のポリシーに応じた柔軟なセンサデータの流通経路の構築が

困難である。それは、従来のデータ利用モデルでは、サービスへの参加をデータの利用ポリシーへの同意とみなし、獲得したデータを画一的にサーバ上で処理・保存していることに起因する。そのため、データの提供者と利用者間で直接的に交渉し適切な流通形態でセンサデータを利用可能なセンサデータ流通基盤を構築する必要がある。

(課題 C) センサデータ流通基盤の利用環境構築に関する課題：汎用デバイスのみを用いる利用者環境においては、即時的なセンサデータ流通基盤の利用環境の構築が困難である。それは、広く普及している D2D 通信プロトコルでは、直接通信可能な端末間でのコミュニケーションのみがサポートされていることに起因する。そのため、端末への特別な設定ならびに参加者間での事前の知識共有をすることなく任意のネットワークを構築可能な機構を実現する必要がある。

5.2 各章の成果

第 1 章 序論：研究背景を示し、本研究の目的と課題を設定した。

第 2 章 自律分散型 P2P 通信基盤：「課題 A：センサデータ流通基盤のネットワーク構築に関する課題」に取り組み、「提案 A：自律分散型 P2P 通信基盤 Waon」を提案した。本提案は、利用者端末による自律分散ネットワークの構築を実現するために、新たな構造化 P2P ネットワークアルゴリズムに基いて構築される P2P 通信基盤である。本基盤では、従来研究における負荷分散時の論理ネットワークの維持コスト増加に着目し、負荷分散領域を敢えて限定して局所的な負荷分散を繰り返すアプローチにより維持コストの抑制を行う。また、このアプローチによって論理ネットワークの構築に必要な要件が緩和されたことで、論理ネットワークの維持コストだけではなく、物理的なトラフィックやネットワークサービスの機能実現の面の全てにおける通信コストを軽減する。さらに、Waon の応用例として大規模災害時における安否情報共有システムを設計・実装し、不安定なネットワーク環境下における通信性能およびシステム要件を検証した。具体的には、大規模災害時を想定した不安定なネットワーク環境下におけるシミュレーション評価を実施し、残存機器のみで安否情報を共有し、安否情報への高い到達可能性を維持で

きることを示した。

以上より，利用者の持つスマートフォンのように計算資源の少ないデバイス間においても構築可能で，また，利用者の移動等によって生じる不安定なネットワーク環境下でも維持可能な端末間ネットワークを実現し，「課題 A：センサデータ流通基盤のネットワーク構築に関する課題」の解決を実現した。

第 3 章 契約概念に基づくセンサデータ流通基盤：「課題 B：センサデータ流通基盤の流通経路構築に関する課題」に取り組み，「提案 B：契約概念に基づくセンサデータ流通基盤 COSAP」を提案した。また，その構成要素として動的なセンサ型アプリケーション構築のためのサービス構成モデルならびに情報流通プロトコル CIFP を設計し，シミュレーション評価によってその有効性を検証した。本提案は，センサデバイス・センサネットワーク・アプリケーションなどのサービス構成要素が，柔軟かつ高度に協調するための相互作用を「契約概念に基づく関係」として定式化し，契約管理（締結・更新・解除等）によって構成を組織化するサービス構成モデルに基いてセンサ型アプリケーションを即時的に構築する。また，構成の組織化はマルチエージェントシステムに関する知見を利用することで，データ提供者のポリシーとデータ利用者の要求を満たすアプリケーション構成およびデータの流通形態を参加者の特別な操作を必要とせず自律的に実現する。これらについて，センサデータ流通を想定したシミュレーション評価を実施し，双方のポリシーを考慮しつつ柔軟な流通経路及び流通形態が自動生成されることを示した。

以上より，データ提供者と利用者間のポリシーを満たす IoT システムを動的に構築可能なシステム構成モデルを実現し，「課題 B：センサデータ流通基盤の流通経路構築に関する課題」の解決を実現した。

第 4 章 センサデータ流通基盤の実環境への適用：「課題 C：センサデータ流通基盤の利用環境構築に関する課題」に取り組み，「提案 C：ツリー型構造化 D2D 通信基盤 ICOS」を提案した。本基盤は，周辺の未知のセンサデバイスから同基盤への参加者を発見して自律的に D2D ネットワークを構築し，プライベートネットワークを構築する基盤である。あらかじめ自機端末への設定等が不要であることからアドホックに利用することができ，また，端末名に基づいたルーティングをおこなうためデバイスやサービスの検

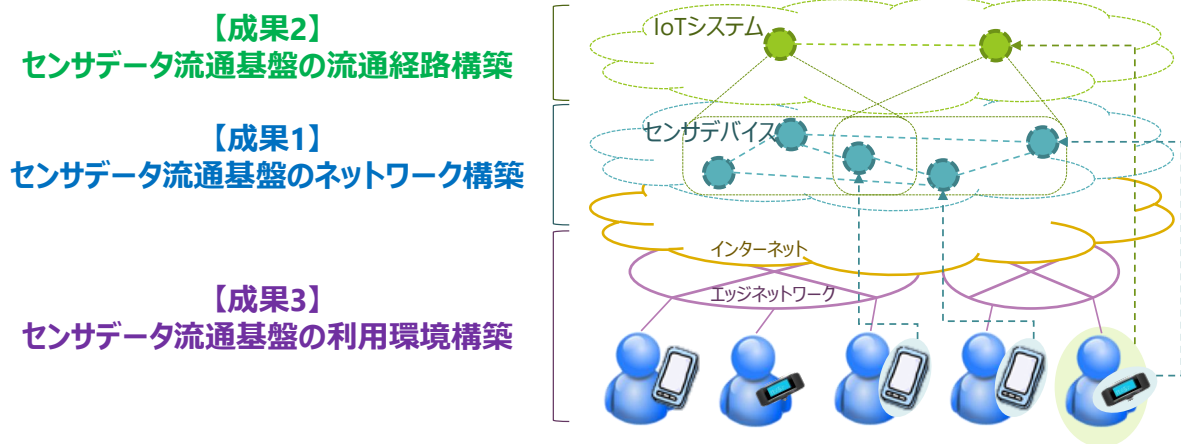


図 5.1 本研究の成果

素を容易に実行できる。実端末を用いた検証により，事前の知識共有なくネットワークを構築し，参加者間で自由にセンサデータを流通できることを示した。

以上より，周辺の参加者を動的に発見しセンサデータ流通基盤を展開可能な機構を実現し，「課題 C：センサデータ流通基盤の利用環境構築に関する課題」の解決を実現した

5.3 本研究の成果

図 5.1 に本研究の成果を示す。本研究では，汎用センサデバイスから得られる様々なセンサデータを，時間・空間・用途・相手に依らずに自由に獲得し共有可能な利用者指向のセンサデータ流通基盤の実現を目的とし，センサデータ流通基盤の構築時，基盤上で構築されるセンサ型アプリケーションの利用時，そしてそれらをスマートフォン等の商用端末を用いた実環境上での利用時という各段階における課題に着目した。そして，これらの課題を解決するために，本研究では自律分散型 P2P 通信基盤 Waon，契約概念に基づくセンサデータ流通基盤 COSAP，ツリー型構造化 D2D 通信基盤 ICOS を提案し，その有効性を確認した。これらの研究成果により，利用者は要求に応じて他者と自由にプライベートなネットワークを構築し，ネットワーク上に即時的に展開されたセンサ型アプリケーションにより必要十分なデータのみを提供・獲得し，それらを普段持ち歩く汎

用デバイスに変更を加えることなく利用することが可能となった。これによって、目的を達成し、社会実装が期待される複数のデバイスやサービスが協調する IoT サービスプラットフォームの実現への貢献を果たした。

5.4 本研究の適用範囲

本研究では、IoT 社会を支えるセンサデータ流通基盤の実現を対象領域とし、様々な参加者やセンサデバイスが相互に協調可能な利用者指向センサデータ流通基盤を提案し、その有用性を確認した。本基盤は、サーバやクラウドといった計算資源が不要なインフラレスなアーキテクチャであり、端末間の接続関係が状況に応じて動的に変化する疎なネットワーク環境においても動作可能であることから、参加者は必要な時に必要なだけ必要な場所からセンサデータをリアルタイムに獲得することが可能となる。そのため、2 章で示した大規模災害時における適用のみならず、日常生活における様々な状況において本基盤がセンサデータの利活用を促進させる可能性がある。具体的には、共有データをセンサデータからアンケート内容などの質的なデータに拡張することで、観光地における局所的な口こみ情報の共有システムや、マルチメディアデータへの拡張によって競技会場やイベント会場におけるリアルタイム配信システムをそれぞれ参加者のニーズに合わせて即時的に構築することが可能となる。このように、本基盤の概念は物理空間とサイバー空間の融合をより促進し、我々の生活そのものを発展させるスマートシティ領域における様々な応用への活用が期待できる。

また、本基盤における水平分散型のサービス構成モデルでは、外部のサーバやクラウドにデータを蓄積せずにデータ所有者がエッジ側で管理し、他者からの要求があった場合のみデータ所有者の権限のもとでセンサデータを開示する。この考えは、エッジコンピューティングだけではなく、IoT 社会において“データを溜めずに流す”ことに主眼をおく情報流 [81, 82] パラダイムの一実現例として貢献できる。また、近年では個人に関するあらゆるデータを自身で管理し、必要最小限のデータのみを事業者や政府に対して提供するパーソナルデータストア (PDS) [83] の社会実装に関する提言が様々な国や地域で

行われている [84–87]。そのため、本基盤における構成要素をセンサデバイスから PDS に拡張することで PDS 間での自律分散的なデータのやり取りが可能となるため、分散 PDS 実現のための一実現例として適用できる可能性がある。

ただし、本基盤はポリシーを満たす不特定多数の参加者からセンサデータを獲得や提供を想定しているため、ある特定の対象者に対して継続的にセンサデータの提供を依頼するような用途への適用は現時点では困難となっている。具体的には、ウェアラブルデバイスから送出される生体情報を定期的に取得して健康状態をモニタリングするような、ヘルスケアシステムへの適用は困難である。このようなユースケースにおいては、観測対象者 (群) をデータ提供者 (Sensor)、観測者をデータ利用者 (App) として捉えることで、契約関係を締結し生体センサ情報を流通させることは可能である。しかし、データ利用者 (App) と利用ポリシーは 1 対 1 で対応付けられるため、得られた生体情報をもとに実施した解析結果から、一部の観測対象のみ条件を変えてより詳細なセンサ値や異なるセンサ種のデータが必要になった場合、ポリシーの変更が観測対象者全体に影響してしまう。この時、変更後のポリシーを持つ App を新たに生成し、一部の観測対象者のみに共有範囲を限定して交渉を実施することで、一応の機能の実現は可能であるが、このような App の複製や Sensor 側からみた提供先 App の切り替え、および複数の App が収集した結果を集約してユーザに提示する手法を効率的に実施するメカニズムは存在しない。そのため、このような流通経路の分岐および統合をシームレスに行う機構を導入することで、不特定多数とのデータ共有だけでなく、特定の個人とのデータ共有への本基盤の適用が可能になると考えられる。

5.5 今後の課題

今後の課題として、第 2 章「自律分散型 P2P 通信基盤」に関しては、端末やその所有者のコンテキストに応じた高度な負荷分散の実現が挙げられる。本基盤におけるノード間の負荷分散では、各ノードの性能差や移動性を考慮しておらず、全てのノードが等しくオーバーレイネットワーク上の責任を負うものとしている。そこで、文献 [88, 89] 等のよ

うに、現状のノードを仮想ノードとして再定義し、物理ノードの性能差やコンテキストに応じて物理ノードが管理する仮想ノード数を増減することでより高度な負荷分散が実現できる可能性がある。

第 3 章「契約概念に基づくセンサデータ流通基盤」に関しては、センサデータ流通交渉時の、より高度な交渉相手の発見機能の実現が挙げられる。本基盤におけるコンポーネント間の交渉においては、双方のポリシーが一致する全ての相手と契約を結びセンサデータの流通経路を構築する。これは、PCN において収集されるデータの不確実性を低減する有効な戦略の一つであるが、センサデータの流通モデルとしてセンサデータ提供者へ見返りとして報酬を与える場合、この戦略ではデータの利用コストが高くなることが考えられる。その場合、複数の交渉相手の候補が発見した場合、それらが提示する報酬の総量を最小化することで少ないコストで必要最低限のセンサデータの流通が実現できる。現在、学術領域において適切な報酬の決定手法が提案されているが [90,91]、制約が多く実環境での利用が困難であるという指摘があることに加え、本基盤での自律分散ネットワークにおいては参加者を一元管理するブローカーの役目を果たすサーバが不在である制約が加わるため、それらの解決は容易ではないと考えられる。また、前節で述べた、適用可能なユースケースを拡張するための、各プロトコルの高機能化および表現力の向上も今後の課題となる。

第 4 章「センサデータ流通基盤の実環境への適用」に関しては、参加者のコンテキストやセンサデータ流通基盤の状況に応じたトポロジ最適化機能の実現が挙げられる。本基盤における D2D ネットワークのトポロジ構築では、最初に GO となった端末をルートとした木構造であり、節となる端末は GO への接続順で決定している。そのため、参加者のポリシーに基づいてプライベートな D2D ネットワークに限定することやインターネットを介した遠隔地の端末とのネットワークへ参加するといった動的なトポロジの再構築を自律的行わせることができれば、サイバー空間でのセンサデータの流通を現実空間のデータの流通として拡張することができ、現実空間とサーバー空間を融合させた環境アウェアな流通基盤の展開が可能になる。

謝辞

本論文を執筆するにあたり，多くの方々にご支援ご協力を賜りました．謹んで御礼申し上げます．

はじめに，日頃の研究活動に際して様々な御指導や御助言を賜りました東北大学サイバーサイエンスセンター 菅沼拓夫教授に心より感謝いたします．菅沼先生には研究テーマを決める段階から相談にのっていただき，技術的な御指導や研究に対するアプローチ手法といった様々な御助言をいただきました．また，論文誌への投稿や国際会議で発表する機会を多く与えて下さり，研究者としてだけではなく，一人の人間としても大きく成長することができました．心より感謝申し上げます．東北大学大学院情報科学研究科 加藤寧教授，及び東北大学大学院情報科学研究科 篠原歩教授には，御多忙のなか本論文を審査していただきました．審査時にいただきました様々な視点からの御助言によって，本論文を更に深化させることができました．深く御礼申し上げます．東北大学サイバーサイエンスセンター 阿部亨准教授には，日頃より研究室ゼミ等を通して御指導・御助言をいただきましたことを心から感謝致します．また，2章の執筆に際して，東北学院大学 武田敦志准教授，並びに仙台高等専門学校 高橋晶子准教授には，多大な御指導をいただきました．心より感謝申し上げます．

菅沼・阿部（亨）研究室の方々には研究活動において様々な御意見をいただき，また研究生活だけではなく多くの時間を共に過ごし，楽しく充実した日々を送ることができました．特に，東北大学大学院情報科学研究科 和泉諭准教授には，研究活動だけではなく日頃の研究室生活において多大な御支援や御協力をいただきました．また，3章の執筆に際して，東北大学大学院工学研究科 市地慶助教，並びに東北大学大学院情報科学研究科 内林俊洋助教には，多大な御指導をいただきました．学生の皆さまにも研究室ゼミ等を

通して様々な御意見や御質問をいただき、刺激と責任感をもって研究に取り組むことができました。特に、同じ博士後期課程である Luisさんと畑さんには研究に関する御意見だけではなく、国際会議での発表の際には事前に英語指導をしていただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

最後に、これまで私をあらゆる面で支えて頂いた全ての方々に、この場を借りて深く感謝致します。本当にありがとうございました。

発表論文

学術雑誌

- (1) Atsushi Takeda, Takuma Oide and Akiko Takahashi: Simple Dynamic Load Balancing Mechanism for Structured P2P Network and Its Evaluation, *International Journal of Grid and Utility Computing*, Vol. 3, No. 2, pp. 126–135 (2012).
- (2) Takuma Oide, Atsushi Takeda, Akiko Takahashi and Takuo Suganuma: A Robust P2P Information Sharing System and Its Application to Communication Support in Natural Disasters, *International Journal of Software Science and Computational Intelligence*, Vol. 5, No. 4, pp. 20–39 (2013).
- (3) 生出拓馬, 武田敦志, 高橋晶子, 菅沼拓夫: ネットワークアウェアな P2P 型安否情報共有システムの提案, *情報処理学会論文誌*, Vol. 55, No. 2, pp. 607–618 (2014).
- (4) Takuma Oide, Toru Abe and Takuo Suganuma: COSAP: Contract-Oriented Sensor-Based Application Platform, *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 8261–8275 (2017).
- (5) Takuo Suganuma, Takuma Oide, Shinji Kitagami, Kenji Sugawara and Norio Shiratori: Multiagent based Flexible Edge Computing Architecture for IoT, *IEEE Network Magazine*, Vol. 32, No. 1, pp. 16–23 (2018).
- (6) Takuma Oide, Toru Abe and Takuo Suganuma: Infrastructure-less Communication Platform for Off-the-shelf Android Smartphones, *Sensors*, (2018) (under

review).

国際会議

- (7) Atsushi Takeda, Takuma Oide and Akiko Takahashi: New Structured P2P Network with Dynamic Load Balancing Scheme, *Proc. IEEE Workshops of International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, pp. 108–113 (2011).
- (8) Atsushi Takeda, Takuma Oide and Akiko Takahashi: A Structured Overlay Network for Aggregating Sensor Data, *Proc. International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications*, pp. 684–689 (2012).
- (9) Takuma Oide, Atsushi Takeda and Akiko Takahashi: Waon: Dynamic Contents Balancing Algorithm for Structured P2P Network, *Proc. International Symposium on Technology for Sustainability*, pp. 333–336 (2012).
- (10) Takuma Oide, Atsushi Takeda, Akiko Takahashi and Takuo Suganuma: SS5 Design of A P2P Information Sharing System and Its Application to Communication Support in Natural Disaster, *Proc. IEEE International Conference on Cognitive Informatics and Cognitive Computing*, pp. 118–125 (2013).
- (11) Takuma Oide, Atsushi Takeda, Takuo Suganuma and Akiko Takahashi: Implementation and Evaluation of the Well-Distribution Algorithm for an Overlay Network, *Proc. IEEE Annual Computer Software and Applications Conference Workshops*, pp. 373–378 (2013).
- (12) Nobuaki Kadowaki, Takuma Oide, Atsushi Takeda and Akiko Takahashi: Design of Topology-aware P2P Personal Safety Information Sharing System based on Z-ordering, *Proc. International Symposium on Technology for Sustainability* (2014).

- (13) Atsushi Takeda, Takuma Oide, Akiko Takahashi and Takuo Suganuma: Scalable and Accurate Data Aggregation Mechanism on Structured P2P Network, *Proc. International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications*, pp. 389–394 (2014).
- (14) Atsushi Takeda, Takuma Oide, Akiko Takahashi and Takuo Suganuma: Accurate Data Aggregation on Unstable Structured P2P Network, *Proc. IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, pp. 542–549 (2015).
- (15) Atsushi Takeda, Takuma Oide, Akiko Takahashi and Takuo Suganuma: Efficient Dynamic Load Balancing for Structured P2P Network, *Proc. International Conference on Network-Based Information Systems*, pp. 432–437 (2015).
- (16) Takuma Oide, Toru Abe and Takuo Suganuma: A Design of Contract-oriented Sensor Application Platform, *Proc. IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops*, pp. 172–177 (2015).
- (17) Takuma Oide, Toru Abe and Takuo Suganuma: A Broker-less Participatory Sensing Scheme by User Matching Mechanism Based on Market Price Approach, *Proc. IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops*, pp. 1–6 (2016).
- (18) Takuma Oide, Toru Abe and Takuo Suganuma: Implementation and Evaluation of Negotiation Mechanism on Server-less IoT Application Platform, *Proc. International Workshop on the Internet of Agents (IoA, AAMAS2017 Workshop)*, pp. 36–55 (2017).

研究会・ワークショップ

- (19) 武田敦志, 生出拓馬, 高橋晶子: 構造型 P2P ネットワークにおける動的負荷分散法, マルチメディア通信と分散処理ワークショップ 2010 論文集, pp. 117–122 (2010) (優秀論文賞受賞).
- (20) 生出拓馬, 武田敦志, 高橋晶子: Waon: 動的負荷分散特性に基づく構造化 P2P ネットワーク, マルチメディア通信と分散処理ワークショップ 2011 論文集, pp. 109–110 (2011).
- (21) 生出拓馬, 武田敦志, 高橋晶子: 動的負荷分散特性に基づく構造化 P2P ネットワークの構築, マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム, pp. 1565–1572 (2012).
- (22) 生出拓馬, 武田敦志, 高橋晶子: 柔軟な動的負荷分散法に基づく構造化 P2P ネットワーク Waon の構築, 第 75 回全国大会講演論文集, pp. 325–326 (2013) (学生奨励賞受賞).
- (23) 生出拓馬, 武田敦志, 高橋晶子: 動的負荷分散法に基づく P2P 安否情報共有システムの構築, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, No. 2, p. 544 (2013).
- (24) 生出拓馬, 阿部亨, 菅沼拓夫: 広域センサネットワークのためのエージェントフレームワークに関する一検討, 第 76 回全国大会講演論文集, pp. 413–414 (2014).
- (25) 生出拓馬, 阿部亨, 菅沼拓夫: 所有者の異なるセンサ間における情報流通プロトコルの基礎的検討, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 114, No. 207, pp. 123–128 (2014).
- (26) 門脇伸明, 生出拓馬, 武田敦志, 菅沼拓夫, 高橋晶子: ノードの物理的位置情報を考慮した P2P 安否情報共有システムの検討, マルチメディア、分散協調とモバイルシンポジウム 2014 論文集, pp. 1136–1143 (2014).
- (27) 武田敦志, 生出拓馬, 高橋晶子, 菅沼拓夫: 構造化 P2P ネットワークにおけるスケーラブルで正確なデータ集計手法, マルチメディア通信と分散処理ワークショップ

- ブ論文集, pp. 243–251 (2014).
- (28) 生出拓馬, 阿部亨, 菅沼拓夫: 契約概念に基づくセンサ型アプリケーションプラットフォームの設計, 第 77 回全国大会講演論文集, pp. 107–108 (2015) (学生奨励賞受賞).
 - (29) 生出拓馬, 阿部亨, 菅沼拓夫: スマートフォンを対象としたストリーム型データ共有プラットフォームの検討, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, p. 98 (2015).
 - (30) 生出拓馬, 阿部亨, 菅沼拓夫: 契約概念に基づくストリーム型データ共有基盤の検討, マルチメディア通信と分散処理ワークショップ 2015 論文集, pp. 92–99 (2015) (奨励賞受賞).
 - (31) 甚野和成, 生出拓馬, 和泉諭, 阿部亨, 菅沼拓夫: SDN を用いた D2D 型無線ネットワーク制御方式の一考察, 第 78 回全国大会講演論文集, pp. 273–274 (2016).
 - (32) 安部充, 生出拓馬, 阿部亨, 菅沼拓夫: 多対多ライブ動画配信のためのグループの嗜好を考慮した D2D 情報流制御に関する一検討, 第 78 回全国大会講演論文集, pp. 271–272 (2016).
 - (33) 生出拓馬, 阿部亨, 菅沼拓夫: サーバレスなセンサ型アプリケーションの構築基盤におけるユーザマッチング手法の提案, 第 78 回全国大会講演論文集, pp. 37–38 (2016).
 - (34) Kazunari Jinno, Takuma Oide, Satoru Izumi, Toru Abe and Takuo Suganuma: Implementation of D2D Wireless Network Control Based on SDN, 平成 28 年度電気関係学会東北支部連合大会, p. 1A18 (2016) (IEEE Sendai Section Student Award, The Encouragement Prize 受賞).
 - (35) 安部充, 生出拓馬, 阿部亨, 菅沼拓夫: グループ偏在環境のための D2D 情報流制御プロトコルの設計, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 116, No. 231, pp. 65–70 (2016).
 - (36) 生出拓馬, 阿部亨, 菅沼拓夫: サーバレスな IoT アプリケーションの構築基盤におけるユーザマッチング手法の設計と評価, 第 24 回マルチメディア通信と分散処

- 理ワークショップ論文集, pp. 1–8 (2016) (奨励賞・優秀プレゼンテーション賞受賞).
- (37) 小川絢也, 生出拓馬, 阿部亨, 菅沼拓夫: 商用 Android 端末間 D2D 通信アプリケーションの構築に関する一考察, 第 79 回全国大会講演論文集, pp. 3-295–3-296 (2017).
- (38) 萱場啓太, 生出拓馬, 阿部亨, 菅沼拓夫: データ提供時のプライバシー設定の適正度を定量化する指標の提案, 第 79 回全国大会講演論文集, pp. 3-617–3-618 (2017).
- (39) 甚野和成, 生出拓馬, 阿部亨, 菅沼拓夫: モバイルアドホックネットワークにおける物理的なトポロジを考慮したコンテンツ検索に関する一検討, 2017 年電子情報通信学会総合大会通信公演論文集, No. 2, p. 148 (2017).
- (40) 生出拓馬, 阿部亨, 菅沼拓夫: 契約概念に基づくストリーム型データ共有基盤におけるセンサデータ共有アプリケーションの試作, 2017 年電子情報通信学会総合大会通信公演論文集, No. 2, p. 142 (2017).
- (41) 萱場啓太, 生出拓馬, 阿部亨, 菅沼拓夫: 個人の好みの明確さに基づくパーソナルデータ流通制御支援手法の提案, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 117, No. 205, pp. 1–6 (2017).
- (42) 甚野和成, 生出拓馬, 阿部亨, 菅沼拓夫: モバイルアドホックネットワークにおける物理的な接続関係を考慮したリソース検索の性能向上に関する検討, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 117, No. 205, pp. 55–60 (2017).
- (43) 生出拓馬, 小川絢也, 阿部亨, 菅沼拓夫: Android 端末を対象にしたマルチホップ通信可能なアドホック D2D 通信基盤の設計と実装, 第 25 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp. 124–131 (2017) (奨励賞・最優秀プレゼンテーション賞受賞).
- (44) 小川絢也, 生出拓馬, 阿部亨, 菅沼拓夫: 屋外イベントでの多数のユーザを対象としたヘルスマモニタリングシステムに関する一考察, 第 80 回全国大会 (2018) (発表予定).
- (45) 阿部隼人, 三浦誠, 生出拓馬, 阿部亨, 菅沼拓夫: 遠隔操作ロボットと全方位カ

メラを用いた遠隔臨場感システムの QoS 制御に関する一検討, 第 80 回全国大会 (2018) (発表予定).

著作物利用許諾

本論文で用いている図表等は出版済の文献から再利用したものを含む．本論文で再利用した文献のリストおよび及び著作物利用許諾を以下に示す．

- Takuma Oide, Toru Abe and Takuo Suganuma: COSAP: Contract-Oriented Sensor-Based Application Platform, *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 8261–8275 (2017).



Title: COSAP: Contract-Oriented Sensor-Based Application Platform
Author: Takuma Oide
Publication: IEEE Access
Publisher: IEEE
Date: 2017

Copyright © 2017, IEEE

LOGIN
If you're a [copyright.com](#) user, you can login to RightsLink using your [copyright.com](#) credentials. Already a RightsLink user or want to [learn more?](#)

Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

BACK

CLOSE WINDOW

Copyright © 2018 Copyright Clearance Center, Inc. All Rights Reserved. [Privacy statement](#). [Terms and Conditions](#). Comments? We would like to hear from you. E-mail us at customercare@copyright.com

参考文献

- [1] Atzori, L., Iera, A., Morabito, G. : The Internet of Things: A survey, *Computer Networks*, Vol. 54, No. 15, pp. 2787–2805 (2010).
- [2] Xu, L. D., He, W. and Li, S.: Internet of Things in Industries: A Survey, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 10, No. 4, pp. 2233–2243 (2014).
- [3] Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L. and Zorzi, M.: Internet of Things for Smart Cities, *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 22–32 (2014).
- [4] ICT 農業の現状とこれから（AI 農業を中心に），農林水産省（オンライン），入手先 http://www.maff.go.jp/j/shokusan/sosyutu/sosyutu/aisystem/pdf/ict_ai.pdf（参照 2017-07-13）.
- [5] cisco: Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2016-2021, available from <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.pdf>（accessed 2017-11-05）.
- [6] 科学技術基本計画-科学技術政策-, 内閣府（オンライン），入手先 <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index5.html>（参照 2017-11-07）.
- [7] 第 5 期科学技術基本計画，内閣府（オンライン），入手先 <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf>（参照 2017-11-07）.
- [8] 電気通信サービスの契約数及びシェアに関する四半期データ，総務省（オンライン），入手先 http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/eidsystem/market01_01.html（参照 2017-07-13）.

- [9] Conti, M. and Giordano, S.: Mobile Ad Hoc Networking: Milestones, Challenges, and New Research Directions, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 52, No. 1, pp. 85–96 (2014).
- [10] Conti, M., Boldrini, C., Kanhere, S. S., Mingozzi, E., Pagani, E., Ruiz, P. M. and Younis, M.: From MANET to people-centric networking: Milestones and open research challenges, *Computer Communications*, Vol. 71, pp. 1–21 (2015).
- [11] Sofia, R., Mendes, P., Damásio, M. J., Henriques, S., Giglietto, F., Giambitto, E. and Bogliolo, A.: Moving Towards a Socially-driven Internet Architectural Design, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 42, No. 3, pp. 39–46 (2012).
- [12] Lane, N. D., Eisenman, S. B., Musolesi, M., Miluzzo, E. and Campbell, A. T.: Urban Sensing: Opportunistic or Participatory?, *Proc. 9th Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pp. 11–16 (2008).
- [13] Delmastro, F., Arnaboldi, V. and Conti, M.: People-Centric Computing and Communications in Smart Cities, *IEEE Communications Magazine*, pp. 122–128 (2016).
- [14] Burke, J. A., Estrin, D., Hansen, M., Parker, A., Ramanathan, N., Reddy, S. and Srivastava, M. B.: Participatory Sensing, *Proc. World Sensor Web Workshop* (2006).
- [15] Campbell, A. T., Eisenman, S. B., Lane, N. D., Miluzzo, E. and Peterson, R. A.: People-Centric Urban Sensing, *Proc. 2nd Annual International Workshop on Wireless Internet*, pp. 18–31 (2006).
- [16] NoiseTube, available from <http://noisetube.net/> (accessed 2017-06-21).
- [17] Dutta, P., Aoki, P. M., Kumar, N., Mainwaring, A., Myers, C., Willett, W. and Woodruff, A.: Common Sense: Participatory Urban Sensing Using a Network of Handheld Air Quality Monitors, *Proc. 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 349–350 (2009).

- [18] Sunyoung, K., Jennifer, M. and Eric, P.: Sensr: Evaluating a Flexible Framework for Authoring Mobile Data-collection Tools for Citizen Science, *Proc. 2013 Conference on Computer Supported Cooperative Work*, pp. 1453–1462 (2013).
- [19] 坂村美奈, 米澤拓郎, 中澤仁, 高汐一紀, 徳田英幸 : Help Me!:参加型センシングにおける参加機会創出のための情報の価値付けと可視化システム, 技術報告 35, 慶應義塾大学環境情報学部, 慶應義塾大学政策・メディア研究科, 慶應義塾大学環境情報学部, 慶應義塾大学環境情報学部, 慶應義塾大学環境情報学部 (2014).
- [20] Zaman, J. and Meuter, W. D.: DisCoPar: Distributed Components for Participatory Campaigning, *Proc. 6th IEEE Workshop on Pervasive Collaboration and Social Networking*, pp. 160–165 (2015).
- [21] Arnaboldi, V., Conti, M. and Delmastro, F.: CAMEO: A novel context-aware middleware for opportunistic mobile social networks, *Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 11, pp. 148–167 (2014).
- [22] IoT 時代のプライバシーとイノベーションの両立, 産業競争力懇談会 (オンライン), 入手先 (<http://www.cocn.jp/thema95-L.pdf>) (参照 2017-07-13).
- [23] 「パーソナルデータの利用・流通に関する研究会」報告書, 総務省 (オンライン), 入手先 (http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01ryutsu02_02000071.html) (参照 2017-11-06).
- [24] Suica に関するデータの社外への提供について, JR 東日本 (オンライン), 入手先 (<https://www.jreast.co.jp/aas/pdf/20151126.pdf>) (参照 2017-07-13).
- [25] 「顧客情報管理委員会」新設と T 会員規約改訂についてのお知らせ, Culture Convenience Club Co.,Ltd. (オンライン), 入手先 (http://www.ccc.co.jp/news/2013/20130927_003721.html) (参照 2017-07-13).
- [26] Lopez, P. G., Montresor, A., Epema, D., Datta, A., Higashino, T., Iamnitchi, A., Barcellos, M., Felber, P. and Riviere, E.: Edge-centric Computing: Vision and Challenges, Vol. 45, No. 5, pp. 37–42 (2015).
- [27] Bonomi, F., Milito, R., Zhu, J. and Addepalli, S.: Fog Computing and Its Role

- in the Internet of Things, *Proceedings of the First Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing*, pp. 13–15 (2012).
- [28] Klas, G.: Edge Computing and the Role of Cellular Networks, *Computer*, Vol. 50, No. 10, pp. 40–49 (2017).
- [29] Fodor, G., Dahlman, E., Mildh, G., Parkvall, S., Reider, N., Miklós, G. and Turányi, Z.: Design Aspects of Network Assisted Device-to-Device Communications, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 50, No. 3, pp. 170–177 (2012).
- [30] Feng, D., Lu, L., Yuan-Wu, Y., Li, G. Y., Li, S. and Feng, G.: Device-to-Device Communications in Cellular Networks, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 52, No. 4, pp. 49–55 (2014).
- [31] Wi-Fi Direct, available from <http://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-direct> (accessed 2017-06-21).
- [32] Stoica, I., Morris, R., Liben-Nowell, D., Karger, D., Kaashoek, M., Dabek, F. and Balakrishnan, H.: Chord: a scalable peer-to-peer lookup protocol for Internet applications, *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, Vol. 11, No. 1, pp. 17–32 (2003).
- [33] Ratnasamy, S., Francis, P., Handley, M., Karp, R. and Shenker, S.: A scalable content-addressable network, *Proceedings of the 2001 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, SIGCOMM '01*, ACM, pp. 161–172 (2001).
- [34] Rowstron, A. and Druschel, P.: Pastry: Scalable, decentralized object location, and routing for large-scale peer-to-peer systems, *Proc. IFIP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms* (2001).
- [35] Zhao, B. Y., Huang, L., Stribling, J., Rhea, S. C., Joseph, A. D. and Kubiatowicz, J. D.: Tapestry: A Resilient Global-Scale Overlay for Service Deployment, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* (2004).
- [36] Bharambe, A. R., Agrawal, M. and Seshan, S.: Mercury: Supporting Scalable

- Multi-Attribute Range Queries, *Proc. ACM SIGCOMM* (2004).
- [37] Information-technology Promotion Agency. https://www.ipa.go.jp/about/press/20130128_2.html.
- [38] 小山由, 水本旭洋, 今津眞也, 安本慶一: 大規模災害時の安否確認システムと広域無線網利用可能エリアへの DTN に基づいたメッセージ中継法, 技術報告 29, 奈良先端科学技術大学院 (2012).
- [39] 佐藤剛至, 柴田義孝: 災害情報システムのための動的ネットワーク再構成手法に基づいたコグニティブ無線の研究, 技術報告 40, 岩手県立大学 (2011).
- [40] 大瀧龍, 重安哲也, 浦上美佐子, 松野浩嗣: 自律的無線ネットワークを用いた被災情報提供システムー被災地域の地形を考慮した無線ノード置局アルゴリズムの提案, 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 1, pp. 308–318 (2011).
- [41] Fall, K.: A delay-tolerant network architecture for challenged internets, *Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, SIGCOMM '03, ACM, pp. 27–34 (2003).
- [42] Schutt, T., Schintke, F. and Reinefeld, A.: Range Queries on Structured Overlay Networks, *Computer Communications* (2008).
- [43] 蛭田瑞生, 鶴岡行雄, 多田好克: 災害情報共有システムの提案, 技術報告 2, 電気通信大学 (2012).
- [44] Sasaki, Y. and Shibata, Y.: A Disaster Information Sharing Method by the Mobile Servers in Challenged Networks, *Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), 2012 26th International Conference on*, pp. 1048–1053 (2012).
- [45] Sylvia, R., Mark, H., Richard, K. and Scott, S.: Topologically-aware overlay construction and server selection, *INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Vol. 3, pp. 1190–1199 (2002).
- [46] Jain, R., Chiu, D. and Hawe, W.: A Quantitative Measure of Fairness and

- Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer Systems, *Technical Report TR-301, DEC Research* (1984).
- [47] Shouyi, Y., Leibo, L., Renyan, Z., Zhongfu, S. and Shaojun, W.: Design of wireless multi-media sensor network for precision agriculture, *Communications, China*, Vol. 10, No. 2, pp. 71–88 (2013).
 - [48] Suh, C. and Ko, Y.-B.: Design and implementation of intelligent home control systems based on active sensor networks, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 54, No. 3, pp. 1177–1184 (2008).
 - [49] Pantelopoulos, A. and Bourbakis, N. G.: A Survey on Wearable Sensor-Based Systems for Health Monitoring and Prognosis, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, Vol. 40, No. 1, pp. 1–12 (2010).
 - [50] Nakamura, M., Matsuo, S., Matsumoto, S., Sakamoto, H. and Igaki, H.: Application Framework for Efficient Development of Sensor as a Service for Home Network System, *2011 IEEE International Conference on Services Computing (SCC)*, pp. 576–583 (2011).
 - [51] Ma, T. H., Tian, W., Wang, B., Guan, D. H. and Lee, S. Y.: Weather Data Sharing System: an Agent-based Distributed Data Management, *IET Software*, Vol. 5, No. 1, pp. 21–31 (2011).
 - [52] Ganti, R. K., Ye, F. and Lei, H.: Mobile Crowdsensing: Current State and Future Challenges, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 49, No. 11, pp. 32–39 (2011).
 - [53] Rana, R. K., Chou, C. T., Kanhere, S. S., Bulusu, N. and Hu, W.: Ear-Phone : An End-to-End Participatory Urban Noise Mapping System, *Proc. International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, pp. 105–116 (2010).
 - [54] DATA GO JP, Japanese Government (online), available from <http://www.data.go.jp/> (accessed 2017-01-17).

- [55] data.gov.uk, UK Government (online), available from [\(https://data.gov.uk/\)](https://data.gov.uk/) (accessed 2017-01-17).
- [56] Data.gov, U.S. General Services Administration (online), available from [\(https://www.data.gov/\)](https://www.data.gov/) (accessed 2017-01-17).
- [57] Predić, B., Yan, Z., Eberle, J., Stojanovic, D. and Aberer, K.: ExposureSense: Integrating Daily Activities with Air Quality using Mobile Participatory Sensing, *Proc. 2013 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops*, pp. 303–305 (2013).
- [58] Opensense, available from [\(http://opensense.epfl.ch/\)](http://opensense.epfl.ch/) (accessed 2016-04-26).
- [59] Jain, R. K., Chiu, D.-M. W. and Hawe, W. R.: A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer Systems, Technical Report TR-301, DEC Research (1984).
- [60] Felice, M. D., Bedogni, L. and Bononi, L.: The Emergency Direct Mobile App: Safety Message Dissemination over a Multi-Group Network of Smartphones Using Wi-Fi Direct, *Proc ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access*, pp. 99–106 (2016).
- [61] Wang, Y., Tang, J., Jin, Q. and Ma, J.: BWMesh: A Multi-hop Connectivity Framework on Android for Proximity Service, *Proc. IEEE International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing and IEEE International Conference on Autonomic and Trusted Computing and IEEE International Conference on Scalable Computing and Communications and Its Associated Workshops (UIC-ATC-ScalCom)*, pp. 278–283 (2015).
- [62] 稲岡裕紀, 峰野博史 : Wi-Fi Direct を用いた DTN による被災情報共有システムの提案, 情報処理学会第 75 回全国大会論文集, pp. 277–278 (2013).
- [63] Kantar: iOS and Android push towards a Two-OS world, available from [\(https://www.kantarworldpanel.com/global/News/\)](https://www.kantarworldpanel.com/global/News/)

- iOS-and-Android-push-towards-a-Two-OS-world> (accessed 2017-06-16).
- [64] Liu, K., Shen, W., Yin, B., Cao, X., Cai, L. X. and Cheng, Y.: Development of Mobile Ad-hoc Networks over Wi-Fi Direct with Off-the-Shelf Android Phones, *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–6 (2016).
 - [65] Casetti, C., Chiasserini, C. F., Duan, Y., Giaccone, P. and Manriquez, A. P.: Data Connectivity and Smart Group Formation in Wi-Fi Direct Multi-group Networks, *IEEE Transactions on Network and Service Management* (2017).
 - [66] Camps-Mur, D., Garcia-Saavedra, A. and Serrano, P.: Device-to-Device Communications with Wi-Fi Direct: Overview and Experimentation, *IEEE Wireless Communications*, Vol. 20, No. 3, pp. 96–104 (2013).
 - [67] Zhang, H., Wang, Y. and Tan, C. C.: WD2: An Improved WiFi-Direct Group Formation Protocol, *Proc. ACM MobiCom Workshop on Challenged Networks*, pp. 55–60 (2014).
 - [68] Yao, C., Zhang, H. and Song, L.: Demo: WiFi Multihop: Implementing Device-to-Device Local Area Networks by Android Smartphones, *Proc. ACM ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pp. 405–406 (2015).
 - [69] Menegato, U. B., Cimino, L. D. S., Delabrida, S., Medeiros, F. A., de Castro Lima, J. and Oliveira, R. A. R.: Dynamic Clustering in WiFi Direct Technology, *Proc. ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access*, pp. 25–29 (2014).
 - [70] Laha, A., Cao, X., Shen, W., Tian, X. and Cheng, Y.: An Energy Efficient Routing Protocol for Device-to-Device Based Multihop Smartphone Networks, *Proc. IEEE International Conference on Communications*, pp. 5448–5453 (2015).
 - [71] Cherif, W., Khan, M. A., Filali, F., Sharafeddine, S. and Dawy, Z.: P2P Group Formation Enhancement for Opportunistic Networks with Wi-Fi Direct, *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 1–6 (2017).

- [72] Khan, M. A., Cherif, W. and Filali, F.: Group Owner Election in Wi-Fi Direct, *Proc. IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics Mobile Communication Conference*, pp. 1–9 (2016).
- [73] 大和田泰伯, 井上真杉, 浜口清: スマートフォン同士による情報共有アプリケーションの実装, 技術報告, 情報通信研究機構耐災害 ICT 研究センター (2016).
- [74] 水村直人, 金岡諒, 斉藤裕樹, 高橋淳二, 戸辺義人: Wi-Fi Direct を用いた複数デバイス間ファイル共有転送最適化の検討, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2016 論文集, Vol. 2016, pp. 105–114 (2016).
- [75] Shahin, A. A. and Younis, M.: Efficient Multi-Group Formation and Communication Protocol for Wi-Fi Direct, *Proc. IEEE 40th Conference on Local Computer Networks*, pp. 233–236 (2015).
- [76] Casetti, C., Chiasserini, C. F., Pelle, L. C., Valle, C. D., Duan, Y. and Giaccone, P.: Content-centric Routing in Wi-Fi Direct Multi-group Networks, *Proc. IEEE International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, pp. 1–9 (2015).
- [77] Casetti, C., Chiasserini, C. F., Pelle, L. C., Valle, C. D., Duan, Y. and Giaccone, P.: A Demonstration for Content Delivery on Wi-Fi Direct Enabled Devices, *Proc. IEEE International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, pp. 1–2 (2015).
- [78] Teófilo, A., Remédios, D., Paulino, H. and ao Lourenço, J.: Group-to-Group Bidirectional Wi-Fi Direct Communication with Two Relay Nodes, *Proc. 12th EAI International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services*, pp. 275–276 (2015).
- [79] Funai, C., Tapparello, C. and Heinzelman, W.: Enabling Multi-hop Ad Hoc Networks Through WiFi Direct Multi-group Networking, *Proc. International Conference on Computing, Networking and Communications*, pp. 491–497 (2017).
- [80] Marinho, R. P., Menegato, U. B. and Oliveira, R. A. R.: IMSN Routing on Wi-

- Fi Direct Enabled Devices, *Proc. ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access*, pp. 31–38 (2015).
- [81] 安本慶一, 山口弘純: モバイル時代のサービスを支える技術: 5. 多数のデータストリームを実時間で融合・編纂し利活用するための次世代「情報流」技術-情報流キューレーション基盤実現に向けた課題抽出と取り組み-, 情報処理, Vol. 55, No. 11, pp. 1281–1287 (2014).
- [82] InfoFlow –情報流プロジェクト–, InfoFlow (オンライン), 入手先 <http://www.infoflow.org/> (参照 2016-04-26).
- [83] データ流通環境整備検討会 AI、IoT 時代におけるデータ活用ワーキンググループ 中間とりまとめ, 首相官邸 (オンライン), 入手先 http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/senmon_bunka/data_ryutsuseibi/dai2/siryoku2.pdf (参照 2017-07-13).
- [84] Information Bank Consortium, available from <http://www.information-bank.net/> (accessed 2016-04-26).
- [85] 砂原秀樹, 山内正人, 金杉洋, 柴崎亮介: 「情報銀行」構想とその技術的課題, マルチメディア、分散協調とモバイルシンポジウム 2014 論文集, Vol. 2014, pp. 1024–1026 (2014).
- [86] Respect Network — A Web-of-Trust Network, (online), available from <https://www.respectnetwork.com> (accessed 2017-07-13).
- [87] HAT: Hub of All Things, (online), available from <https://hubofallthings.com> (accessed 2017-07-13).
- [88] Rao, A., Lakshminarayanan, K., Surana, S., Karp, R. and Stoica, I.: Load Balancing in Structured P2P Systems, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 2735, pp. 68–79 (2003).
- [89] Godfrey, B., Lakshminarayanan, K., Surana, S., Karp, R. and Stoica, I.: Load balancing in dynamic structured P2P systems, *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*,

Vol. 4, pp. 2253–2262 (2004).

- [90] Lee, J.-S. and Hoh, B.: Sell Your Experiences: A Market Mechanism based Incentive for Participatory Sensing, *Proc. 2010 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom '10)*, pp. 60–68 (2010).
- [91] Yang, D., Xue, G., Fang, X. and Tang, J.: Crowdsourcing to Smartphones: Incentive Mechanism Design for Mobile Phone Sensing, *Proc. 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 173–184 (2012).